



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADOS VERDES EM
ARACAJU-SE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

MARIA FRANCIELLE SANTOS MENEZES

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2019

MARIA FRANCIELLE SANTOS MENEZES

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADOS VERDES EM
ARACAJU-SE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Linha de pesquisa: Gestão e Meio Ambiente

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Carla Fernanda Barbosa
Teixeira.

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2019

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

M543a Menezes, Maria Francielle Santos
Avaliação do desempenho térmico de telhados verdes em Aracaju-SE através de simulação computacional / Maria Francielle Santos Menezes ; orientadora Carla Fernanda Barbosa Teixeira. - São Cristóvão, 2019.
125 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2019.

1. Engenharia civil. 2. Telhados – Efeitos da temperatura. 3. Análise térmica. 4. Simulação (Computadores). I. Teixeira, Carla Fernanda Barbosa, orient. II. Título.

CDU 624.024

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MARIA FRANCIELLE SANTOS MENEZES

APRESENTADO AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 15 DE OUTUBRO DE 2019

BANCA EXAMINADORA:

Professora Doutora Carla Fernanda Barbosa Teixeira
Orientadora
Universidade Federal de Sergipe

Professora Doutora Débora de Gois Santos
1ª Examinadora
Universidade Federal de Sergipe



Professora Doutora Loyde Vieira de Abreu-Harbich
2ª Examinadora
Universidade Federal de Goiás

Aos meus pais, ao meu irmão, às minhas avós e
aos meus avôs (*in memoriam*), dedico.

RESUMO

A cobertura vegetal natural do solo foi suprimida para dar espaço a novas edificações por causa do aumento da urbanização das cidades. Essas construções, principalmente em regiões tropicais, estão sujeitas à radiação solar elevada, propiciando o aumento das temperaturas internas. Nos últimos anos, a tomada de consciência ambiental implicou a busca por soluções construtivas menos impactantes na Construção Civil. Uma das maneiras de incrementar o caráter sustentável desse setor é através da instalação de telhados verdes nas construções. Além de ser menos degradante para o meio ambiente, a implantação de telhados verdes apresenta outras vantagens, tais como a melhora do microclima interno da edificação. Em virtude disso, o objetivo do presente trabalho foi comparar o desempenho térmico de três tipos de cobertura (telhado verde intensivo, telhado verde extensivo e telha cerâmica não esmaltada) sujeitos às condições climáticas de Aracaju - SE, por meio de simulação computacional. Analisou-se a influência do telhado verde em um protótipo, para fins de calibração e em uma sala de aula sujeitos ao clima da referida cidade. Primeiramente, foram criados os modelos computacionais do protótipo e da sala de aula no *Sketchup*®, por meio do plugin *Euclid*®. O próximo passo consistiu na calibração do modelo do protótipo através da comparação entre os resultados da simulação e os dados medidos experimentalmente. Depois da calibração, foram realizadas seis simulações térmicas no modelo do protótipo, com alteração das seguintes variáveis em cada simulação: o tipo de cobertura (telha cerâmica não esmaltada, telhado verde extensivo e telhado verde intensivo) e a condição de fronteira exterior da parede (parede diatérmica e parede adiabática). Posteriormente, foram realizadas as simulações térmicas do modelo computacional da sala de aula, com a alteração do tipo de cobertura em cada simulação (telha cerâmica não esmaltada, telhado verde extensivo e telhado verde intensivo). As simulações foram realizadas para todas as horas do ano e as análises dos resultados contemplaram duas semanas: uma semana representativa da estação seca e uma semana representativa da estação chuvosa. Nas simulações com o protótipo, o uso do telhado verde propiciou reduções na temperatura interna de até 0,89 °C (parede diatérmica) e de até 3,65 °C (parede adiabática). Já nas simulações com a sala de aula, o uso do telhado verde propiciou reduções na temperatura interna de até 1,15 °C. De forma geral, o desempenho térmico do telhado intensivo e do telhado extensivo foram superiores ao da telha cerâmica, tanto no protótipo quanto na sala de aula, principalmente na estação seca. Logo, o presente trabalho agrega valor aos profissionais que desejam trabalhar com telhados verdes e conhecer mais a fundo a melhoria no desempenho térmico propiciado pelos mesmos.

Palavras-chave: telhado verde; desempenho térmico; simulação computacional.

ABSTRACT

The natural vegetation cover of the soil was suppressed to give space to new buildings because of an increase in the urbanization of the cities. These buildings, especially those in tropical regions, are subjected to elevated solar radiation, leading to higher temperatures indoors. In the recent years, the urge in environmental awareness fueled the search for less environmentally harmful solutions in Civil Construction. One way to improve the sustainable character in this field is through the installation of green roofs in buildings. Besides being less environmentally impactful, the installation of green roofs has other advantages, such as improving the internal microclimate of the building. Keeping that in mind, the overall goal of this study was to compare the thermal performance of three types of green roof (intensive green roof, unglazed ceramic roof tile, and extensive green roof) through computational simulation subjected to the weather conditions of the city of Aracaju, in the state of Sergipe (Brazil). The influence of green roofs on a classroom was analyzed in a prototype for calibration purposes. First, computational models of the prototype and the classroom have been created in the software Sketchup™, through the plug-in Euclid™. Next, the prototype model was calibrated through comparisons between the simulation results and experimentally measured ones. After the calibration, six thermal simulations of the model were performed changing the following variables: type of roof (unglazed ceramic roof tile, extensive green roof and intensive green roof) and the boundary condition on the external side of the walls (adiabatic vs diathermal walls). Subsequently, thermal simulations of the classroom model were performed changing its roof cover (unglazed ceramic roof tile, extensive green roof and intensive green roof) in each simulation. The simulations covered all the hours in the year and the analysis of the results involved two weeks: one representing a dry season and one representing a rainy season. In the simulations with the prototype, the use of the green roof led to internal temperature reductions of the building up to 0.89 °C (diathermal wall) and up to 3.65 °C (adiabatic wall). In the classroom simulations, the use of the green roof led to internal temperature reductions up to 1.15 °C. Overall, the thermal performance of the intensive green roof and extensive green roof were superior to that of the unglazed ceramic roof tile for both the prototype and the classroom, especially for the dry season. Therefore, this work adds value to professionals aiming to work with green roofs and to acquire a deeper knowledge about the enhancement in thermal performance promoted by them.

Keywords: Green roof; thermal performance; computational simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cobertura verde extensiva.	23
Figura 2 - Telhado extensivo completo.	24
Figura 3 - Telhado extensivo modular.....	24
Figura 4 - Telhado extensivo com vegetação pré-cultivada.	24
Figura 5 - Cobertura verde intensiva.	25
Figura 6 - Cobertura verde semi-intensiva.	27
Figura 7 - Constituição típica de uma camada de telhado verde.	28
Figura 8 - Representação simplificada do balanço de energia em um telhado verde.....	42
Figura 9 - Troca de energia entre o telhado verde e o ambiente.	43
Figura 10 - Localização geográfica de Aracaju.....	44
Figura 11 - Zona Bioclimática 8.....	45
Figura 12 - Etapas do trabalho.....	46
Figura 13 - Planta baixa do protótipo.	47
Figura 14 - Corte do protótipo.....	48
Figura 15 - Modelo do protótipo no <i>Sketchup</i> ®.....	49
Figura 16 - Modelo da sala de aula no <i>Sketchup</i> ®.	50
Figura 17 - Planta baixa da tipologia padrão de uma sala de aula de escola estadual.....	51
Figura 18 - Simulações realizadas na primeira fase.	52
Figura 19 - Simulações realizadas na segunda fase.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais vantagens e desvantagens da cobertura extensiva e da intensiva.....	26
Quadro 2 - Comparação entre a cobertura extensiva, a semi-intensiva e a intensiva.....	27
Quadro 3 - Descrição dos grupos do <i>EnergyPlus</i> ®.....	41
Quadro 4 - Convenção para as simulações.....	53
Quadro 5 - Dados físicos dos materiais utilizados nos modelos.	54
Quadro 6 - Parâmetros físicos do vidro da janela.....	54
Quadro 7 - Dados físicos das camadas utilizados nos telhados verdes.	54
Quadro 8 - Parâmetros gerais da vegetação e do substrato dos telhados verdes.	55
Quadro 9 - Parâmetros específicos dos telhados verdes.....	55
Quadro 10 - MBE e RMSE dos valores medidos e simulados para o telhado extensivo.....	57
Quadro 11 - MBE e RMSE dos valores medidos e simulados para a telha cerâmica.	58
Quadro 12 - Dados de temperatura da telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação seca.....	60
Quadro 13 - Dados de temperatura da telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação chuvosa.	61
Quadro 14 - Dados de temperatura da telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação seca.....	63
Quadro 15 - Dados de temperatura da telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação chuvosa.	64
Quadro 16 - Dados de temperatura do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação seca.....	66
Quadro 17 - Dados de temperatura do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação chuvosa.	68
Quadro 18 - Dados de temperatura do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação seca.....	70
Quadro 19 - Dados de temperatura do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação chuvosa.	72
Quadro 20 - Dados de temperatura do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação seca.....	74
Quadro 21 - Dados de temperatura do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação chuvosa.	76
Quadro 22 - Dados de temperatura do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação seca.....	78
Quadro 23 - Dados de temperatura do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação chuvosa.	80
Quadro 24 - Dados de temperatura da telha cerâmica (SC) na estação seca.	94
Quadro 25 - Dados de temperatura da telha cerâmica (SC) na estação chuvosa.....	96
Quadro 26 - Dados de temperatura do telhado extensivo (SE) na estação seca.....	97
Quadro 27 - Dados de temperatura do telhado extensivo (SE) na estação chuvosa.....	99
Quadro 28 - Dados de temperatura do telhado intensivo (SI) na estação seca.....	101
Quadro 29 - Dados de temperatura do telhado intensivo (SI) na estação chuvosa.	103

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Evolução das temperaturas internas do protótipo com telhado extensivo.	57
Gráfico 2 - Evolução das temperaturas superficiais internas do telhado extensivo.	58
Gráfico 3 - Evolução das temperaturas internas do protótipo com telha cerâmica.	58
Gráfico 4 - Evolução das temperaturas superficiais internas da telha cerâmica.	59
Gráfico 5 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação seca.	60
Gráfico 6 - Temperatura interna do protótipo com telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação seca.	61
Gráfico 7 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação chuvosa.	62
Gráfico 8 - Temperatura interna do protótipo com telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação chuvosa.	62
Gráfico 9 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação seca.	63
Gráfico 10 - Temperatura interna do protótipo com telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação seca.	64
Gráfico 11 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação chuvosa.	65
Gráfico 12 - Temperatura interna do protótipo com telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação seca.	65
Gráfico 13 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação seca.	66
Gráfico 14 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação seca.	67
Gráfico 15 - Temperatura interna do protótipo com telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação seca.	67
Gráfico 16 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação chuvosa.	68
Gráfico 17 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação chuvosa.	69
Gráfico 18 - Temperatura interna do protótipo com telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação chuvosa.	69
Gráfico 19 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação seca.	70
Gráfico 20 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação seca.	71
Gráfico 21 - Temperatura interna do protótipo com telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação seca.	71
Gráfico 22 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação chuvosa.	72
Gráfico 23 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação chuvosa.	73
Gráfico 24 - Temperatura interna do protótipo com telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação chuvosa.	73

Gráfico 25 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação seca.	74
Gráfico 26 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação seca.....	75
Gráfico 27 - Temperatura interna do protótipo com telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação seca.	75
Gráfico 28 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação chuvosa.	76
Gráfico 29 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação chuvosa.	77
Gráfico 30 - Temperatura interna do protótipo com telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação chuvosa.	77
Gráfico 31 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação seca.	78
Gráfico 32 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação seca.	79
Gráfico 33 - Temperatura interna do protótipo com telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação seca.	79
Gráfico 34 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação chuvosa.	80
Gráfico 35 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação chuvosa.	81
Gráfico 36 - Temperatura interna do protótipo com telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação chuvosa.	81
Gráfico 37 - Temperaturas internas do protótipo com os diferentes tipos de cobertura, com parede diatérmica e na estação seca.	82
Gráfico 38 - Temperaturas superficiais internas dos telhados, com parede diatérmica e na estação seca.....	83
Gráfico 39 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados, com parede diatérmica e na estação seca.....	84
Gráfico 40 - Temperaturas internas do protótipo com os diferentes tipos de cobertura, com parede diatérmica e na estação chuvosa.	85
Gráfico 41 - Temperaturas superficiais internas dos telhados, com parede diatérmica e na estação chuvosa.	86
Gráfico 42 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados, com parede diatérmica e na estação chuvosa.....	88
Gráfico 43 - Temperaturas internas do protótipo com os diferentes tipos de cobertura, com parede adiabática e na estação seca.	89
Gráfico 44 - Temperaturas superficiais internas dos telhados, com parede adiabática e na estação seca.....	90
Gráfico 45 - Temperaturas superficiais externas dos telhados, com parede adiabática e na estação seca.....	91
Gráfico 46 - Temperaturas internas do protótipo com os diferentes tipos de cobertura, com parede adiabática e na estação chuvosa.....	92
Gráfico 47 - Temperaturas superficiais internas dos telhados, com parede adiabática e na estação chuvosa.	93

Gráfico 48 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados, com parede adiabática e na estação chuvosa.....	94
Gráfico 49 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica (SC) na estação seca.	95
Gráfico 50 - Temperatura interna do ambiente com telha cerâmica (SC) na estação seca.	95
Gráfico 51 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica (SC) na estação chuvosa.	96
Gráfico 52 - Temperatura interna do ambiente com telha cerâmica (SC) na estação chuvosa.	97
Gráfico 53 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo (SE) na estação seca.	98
Gráfico 54 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo (SE) na estação seca.	98
Gráfico 55 - Temperatura interna do ambiente com telhado extensivo (SE) na estação seca.	99
Gráfico 56 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo (SE) na estação chuvosa.	100
Gráfico 57 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo (SE) na estação chuvosa.	100
Gráfico 58 - Temperatura interna do ambiente com telhado extensivo (SE) na estação chuvosa.	101
Gráfico 59 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo (SI) na estação seca.	102
Gráfico 60 - Temperatura superficial externa do telhado intensivo (SI) na estação seca.	102
Gráfico 61 - Temperatura interna do ambiente com telhado intensivo (SI) na estação seca.	103
Gráfico 62 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo (SI) na estação chuvosa.	104
Gráfico 63 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo (SI) na estação chuvosa.	104
Gráfico 64 - Temperatura interna do ambiente com telhado intensivo (SI) na estação chuvosa.	105
Gráfico 65 - Temperaturas internas da sala com os diferentes tipos de cobertura na estação seca.	106
Gráfico 66 - Temperaturas superficiais internas dos telhados na estação seca.	107
Gráfico 67 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados na estação seca.	108
Gráfico 68 - Temperaturas internas da sala com os diferentes tipos de cobertura na estação chuvosa.	109
Gráfico 69 - Temperaturas superficiais internas dos telhados na estação chuvosa.	110
Gráfico 70 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados na estação chuvosa...	111
Gráfico 71 - Radiação solar global para a semana representativa da estação chuvosa.	125
Gráfico 72 - Radiação solar global para a semana representativa da estação seca.	125

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	American Society for Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
BLAST	Building Loads Analysis and System Thermodynamics
BREEAM	Building Research Establishment
DOE	United States Department of Energy
EUA	Estados Unidos da América
IAF	Índice de área foliar
IGRA	International Green Roof Association
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MBE	Mean bias error
NBR	Norma Brasileira
TCPD	Simulação do protótipo com telha cerâmica e parede diatérmica
TCPA	Simulação do protótipo com telha cerâmica e parede adiabática
TEPD	Simulação do protótipo com telhado extensivo e parede diatérmica
TEPA	Simulação do protótipo com telhado extensivo e parede adiabática
TIPD	Simulação do protótipo com telhado intensivo e parede diatérmica
TIPA	Simulação do protótipo com telhado intensivo e parede adiabática
PEAD	Polietileno de alta densidade
RMSE	Root mean square error
SC	Simulação da sala de aula com telha cerâmica
SE	Simulação da sala de aula com telhado extensivo

SI Simulação da sala de aula com telhado intensivo

WRF Weather Research and Forecasting

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Celsius
cm	Centímetro
dB	Decibel
ha	Hectare
J	Joule
K	Kelvin
m	Metro
m³	Metro cúbico
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVO GERAL	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	TELHADOS VERDES	21
3.1.1	Histórico	21
3.1.2	Tipos	23
3.1.2.1	Extensivo	23
3.1.2.2	Intensivo	25
3.1.2.3	Semi-intensivo	26
3.1.3	Detalhes construtivos	27
3.1.4	Influência dos telhados verdes no ambiente construído	32
3.1.5	Legislação e políticas de incentivo	37
3.2	MODELAGEM E SIMULAÇÃO	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1	DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	44
4.2	ETAPAS DA PESQUISA	46
4.3	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SIMULAÇÃO	51
4.4	TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS PELO <i>SOFTWARE</i>	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO	57
5.2	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
5.2.1	Simulação TCPD	60
5.2.2	Simulação TCPA	63
5.2.3	Simulação TEPD	66
5.2.4	Simulação TEPA	70
5.2.5	Simulação TIPD	74
5.2.6	Simulação TIPA	78
5.2.7	Comparações entre as três tipologias de cobertura	82
5.2.7.1	Parede diatérmica	82
5.2.7.2	Parede adiabática	88
5.2.8	Simulação SC	94
5.2.9	Simulação SE	97

5.2.10	Simulação SI.....	101
5.2.11	Comparações entre as três tipologias de cobertura.....	105
6	CONCLUSÕES	113
	REFERÊNCIAS	115
	APÊNDICE A	125

1 INTRODUÇÃO

Antes que as atividades humanas começassem a causar impactos negativos no planeta, o solo e a vegetação formavam um ecossistema balanceado. Com o desenvolvimento industrial, a degradação ambiental intensificou-se, a cobertura vegetal natural do solo foi retirada e as cidades tornaram-se cada vez mais impermeabilizadas (GETTER; ROWE, 2006).

No caso específico da Construção Civil, essa perda de cobertura vegetal, aliada ao uso de materiais de construção com alta capacidade de absorver calor, resultaram em edificações com temperaturas internas cada vez mais elevadas. Além disso, a repetição de tipologias arquitetônicas, sem levar em consideração as diversidades climáticas regionais, também contribuiu para a construção de edificações com baixo desempenho térmico (GETTER, ROWE, 2006; LOPES, 2007; FERRAZ, 2012).

É importante ressaltar que independentemente do tipo, sejam elas residenciais, comerciais, industriais ou escolares, as edificações precisam atender a um limite mínimo de desempenho térmico para que os usuários possam exercer suas atividades de maneira adequada (GUIMARÃES, 2012).

No caso de edificações comerciais e industriais, o desempenho térmico do ambiente pode interferir no bem-estar, na saúde e na produtividade dos trabalhadores (ARAÚJO, 2012). Já no caso de edificações escolares, vários trabalhos comprovaram que a capacidade de aprendizado e a atenção dos alunos é influenciada pelas condições térmicas do ambiente escolar (UHMAN, 2016; MARÇAL et al., 2018; SPAGNUOLO et al., 2018).

Nos últimos anos, as preocupações com os impactos ambientais do setor da Construção Civil, bem como o baixo desempenho térmico das edificações, levaram à retomada de práticas da arquitetura bioclimática que eram utilizadas desde épocas antigas, como a instalação de telhados verdes nas construções (LOPES, 2007; GONÇALVES, 2013).

Os telhados verdes são também conhecidos como ecotelhados, coberturas vivas, telhados jardins, coberturas vegetadas, tetos verdes, entre outras nomenclaturas. Basicamente são coberturas compostas minimamente pelas seguintes camadas: barreira impermeável, camada de drenagem, camada filtrante, substrato e vegetação (PARIZOTTO; LAMBERTS, 2011).

Essa estratégia bioclimática é útil tanto para regiões de clima frio quanto para as de clima quente. Nas regiões frias, as coberturas verdes funcionam como massa térmica para

aquecimento, impedindo o resfriamento da construção. No caso de regiões de clima quente, os telhados verdes melhoram o microclima interno da edificação, visto que o calor é retirado do ambiente para que processos fisiológicos da vegetação, como a evapotranspiração, possam ocorrer (MINKE, 2005).

O uso de tetos verdes nas edificações é uma solução eficaz do ponto de vista arquitetônico. Dentre as vantagens advindas do uso dessa técnica, pode-se citar a melhoria na gestão do risco de cheias, o aumento do isolamento sonoro, da vida útil da membrana da cobertura e da biodiversidade e a diminuição da demanda energética para resfriamento, dos efeitos advindos das ilhas de calor urbano, da poluição do ar (GETTER; ROWE, 2006; OBERNDOFER et al., 2007).

De acordo com Lamberts et al. (2010), grande parte da radiação incidente na cobertura verde é absorvida pelas espécies vegetais para as suas funções biológicas, como transpiração, evaporação, fotossíntese e respiração, o que contribui para o resfriamento passivo da cobertura. Além disso, o albedo¹ da vegetação, a baixa difusividade térmica da camada de solo e o efeito sombreador das espécies vegetais melhoram o microclima interno da edificação.

Conforme Saadatian et al. (2013), o custo inicial para a instalação de um sistema de cobertura verde é superior ao de um telhado convencional. Entretanto, o menor gasto energético para resfriamento propiciado pela utilização do telhado verde contribui para a economia financeira, o que compensa os custos iniciais elevados.

Ainda hoje, a utilização de coberturas verdes é bastante incipiente no Brasil, visto que existem poucos estudos sobre o tema em âmbito nacional. Vale ressaltar que foi realizado um mapeamento sistemático da Literatura, com relação aos trabalhos brasileiros que trataram da questão dos telhados verdes, nas bases *Web of Science*® e *Scopus*®, que são bases de pesquisa reconhecidas. Ademais, foi adotada a *string* “*green roof*” nas pesquisas e só foram considerados os artigos publicados até o dia 01/05/2019, visto que a pesquisa foi realizada nesse dia.

Na base *Web of Science*®, foram encontradas apenas 26 publicações e o trabalho mais antigo era do ano de 2011. Já na base *Scopus*®, foram encontradas 34 publicações e o

¹ “Razão entre a radiação solar refletida e a radiação solar incidente em uma superfície.” (LOPES et al., 2012)

trabalho mais antigo era de 2005. Considerando as duas bases e eliminando-se os artigos comuns nas duas, encontrou-se um total de 44 artigos.

No caso específico de Aracaju - SE, a cidade já começa a sofrer com as consequências danosas advindas do processo de urbanização, mesmo não sendo tão desenvolvida como outras capitais brasileiras. O clima quente do município, a falta de vegetação nativa e a grande parcela de solo impermeabilizado contribuem para o aumento da temperatura interna das construções (ANJOS et al., 2017).

Nesse sentido, a utilização de coberturas vegetadas nessa cidade pode ser uma proposta interessante para a melhoria do microclima interno da edificação. Dessa forma, desenvolve-se o presente trabalho com o intuito de investigar se a instalação de telhados verdes pode melhorar as temperaturas internas das edificações de Aracaju - SE.

Na presente pesquisa, primeiramente foi analisada a influência do telhado verde em um protótipo em escala reduzida, para fins de calibração, e posteriormente analisou-se essa influência em uma construção em escala real (estudo de caso).

O estudo de caso escolhido para esse trabalho foi uma sala de aula de uma escola pública de Aracaju - SE. Optou-se por analisar esse tipo de ambiente pelas razões explanadas anteriormente: as condições térmicas do ambiente escolar, principalmente das salas de aula, refletem na capacidade de aprendizado e na atenção dos estudantes. Ademais, a cobertura verde poderia servir para outros fins, como a implantação de uma horta orgânica, por exemplo.

Além disso, a preocupação com o desempenho térmico em escolas públicas é minimizada, visto que a maioria das edificações escolares possui um projeto arquitetônico padronizado, sem levar em consideração as particularidades climáticas locais, o que implica ambientes escolares com baixo desempenho térmico (SILVA; TALAIA, 2012; UHMAN, 2016; SPAGNUOLO et al., 2018).

Como o telhado verde é uma conhecida estratégia bioclimática usada para melhorar o microclima interno da construção, supõe-se que os ambientes com essa cobertura, tanto o protótipo quanto a sala de aula, apresentarão temperaturas internas mais reduzidas que o ambiente com cobertura tradicional.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral dessa pesquisa é comparar o desempenho térmico de três tipos de cobertura (telhado verde intensivo, telhado verde extensivo e telha cerâmica não esmaltada) sujeitos às condições climáticas de Aracaju - SE, por meio de simulação computacional.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar os dados medidos experimentalmente com os dados resultantes da simulação térmica do protótipo, para fins de calibração;
- Estimar o comportamento térmico de três tipos de cobertura instalados no protótipo;
- Estimar o comportamento térmico de três tipos de cobertura instalados na sala de aula.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TELHADOS VERDES

3.1.1 Histórico

De acordo com Ferraz (2012), há séculos que as coberturas vegetadas fazem parte da arquitetura vernacular, com o propósito de proporcionar a regulação térmica das edificações. Consoante Osmundson (1999) apud Almeida et al. (2018), o uso dessa estratégia bioclimática teve início na Mesopotâmia, onde foram construídos templos religiosos denominados Zigurates, que possuíam vegetação na cobertura.

Outra obra bastante antiga que utilizou essa tecnologia foram os Jardins Suspensos da Babilônia, datados de aproximadamente 600 a. C. Civilizações clássicas como os romanos e os *vikings* também fizeram uso dessa tipologia construtiva. Ademais, durante os séculos XVI e XVII, foram encontradas coberturas verdes em países como Islândia, México, Espanha, entre outros (GETTER; ROWE, 2006; LAMBERTS et al., 2010).

Historicamente, essa estratégia bioclimática foi utilizada em países de clima frio, como aqueles localizados na parte setentrional da Europa, para propiciar proteção e isolamento térmico e em países de clima quente com o intuito de resfriar e aumentar a taxa de umidade do interior da construção (MARTENS, BASS, ALCAZAR, 2008).

A efetivação do uso de telhados verdes ocorreu somente após a Revolução Industrial, em virtude da maior atenção dada às políticas ambientais na época, uma vez que inúmeros impactos ambientais começaram a surgir durante esse período, como a formação de ilhas de calor, a intensificação do efeito estufa, entre outros (FRANÇA, 2012).

O telhado verde moderno originou-se na Alemanha em 1880, em decorrência da rápida urbanização pela qual o país passou. Na época, as coberturas eram compostas por piche, que era bastante inflamável, o que aumentava o risco de incêndio. Em virtude disso, Koch desenvolveu um telhado menos inflamável, que possuía uma espécie de piche coberto com uma camada de areia e cascalho (KOHLENER; KEELY, 2005 apud CATUZZO, 2013).

No século XX, foi observada a crescente necessidade de desenvolvimento de políticas ambientais, com o intuito de atenuar os problemas gerados pelo modelo de desenvolvimento adotado pela sociedade. Nessa perspectiva, os telhados verdes foram incorporados pela Engenharia Civil e Arquitetura, que aperfeiçoaram essa técnica (ALMEIDA et al., 2018).

Os dois grandes expoentes da Arquitetura Moderna, Le Corbusier e Frank Lloyd Wright, utilizaram a cobertura vegetada no século XX. Na década de 1960, essa tecnologia foi desenvolvida em países como a Suíça e a Alemanha. Já nos anos 1970, surgiram várias pesquisas que estudaram os componentes dos tetos verdes, como o substrato, a camada de drenagem, entre outros (PECK et al., 1999).

Atualmente, vários países da América do Norte e da Ásia apostam nessa tecnologia, como EUA, Canadá e Japão. Nesses países, existem inúmeras pesquisas científicas sobre o tema e há apoio político para a adoção dessa prática. No caso específico do Japão, o país estimula o uso das coberturas vegetadas, visto que se trata de uma tecnologia essencial para dirimir os efeitos advindos das ilhas de calor urbanas (DUNNET; KINGSBURY, 2008 apud BERARDI, GHAFARIAN-HOSEINI, GHAFARIAN-HOSEINI, 2014; LAMBERTS et al., 2010).

A Alemanha destaca-se por ser o líder mundial no uso de telhados verdes, visto que aproximadamente 10% das habitações possuem cobertura com vegetação. No século XIX, ocorreu um aumento considerável no uso de coberturas vegetadas no país. Dos anos 1980 até os dias atuais, houve o lançamento de vários programas de incentivos para o uso desse tipo de cobertura, o que propiciou a redução dos custos de sua instalação. Ademais, a área coberta por telhados verdes cresce em média 13,5 milhões de m² a cada ano (DUNNETT; KINGSBURY, 2004 apud LI; YEUNG, 2014; OBERNDORFER et al., 2007).

No Brasil, o primeiro terraço jardim construído foi no prédio do Ministério da Educação e Saúde, situado no Rio de Janeiro e projetado por Lúcio Costa, cujo planejamento vegetal foi realizado por Burle Marx. Além desse, outros edifícios com cobertura vegetal foram construídos no país, como o prédio da Petrobras, também localizado no Rio de Janeiro. Entretanto, até meados do século XX, essa prática construtiva era negligenciada por muitos profissionais brasileiros (FERRAZ, 2012; ALMEIDA et al., 2018).

Como exemplo de escolas com cobertura vegetada, pode-se citar, na rede pública de ensino, o Colégio Estadual Eric Walter Heine, localizado no Rio de Janeiro, que foi a primeira escola ecológica do Brasil, inclusive recebendo a certificação LEED. A cobertura da mesma, que é constituída por telhado verde, ajuda a melhorar o microclima interno da edificação, em uma região com temperaturas elevadas (AGNOL et al., 2013).

Com relação à rede privada de ensino, existe a Escola Graduada de São Paulo, que possui módulos ajardinados de cobertura, confeccionados integralmente com plástico

reciclado e compostos com espécies vegetais resistentes a condições climáticas desfavoráveis, como seca, e com baixas necessidades de manutenção (UHMAN, 2016).

3.1.2 Tipos

De acordo com Ferraz (2012), os telhados verdes são classificados levando-se em consideração o tipo de vegetação, a espessura do substrato e o uso da cobertura. Vale ressaltar que a estrutura da cobertura deve ser dimensionada de modo a suportar a carga adicionada pela cobertura verde.

3.1.2.1 Extensivo

Esse tipo de cobertura foi originalmente utilizado nas residências da Islândia e nos depósitos de bebidas da Hungria. O telhado extensivo faz uso de espécies resistentes, que não necessitam de manutenção constante (Figura 1). O peso varia de 60-150 kg/m², a espessura do substrato oscila entre 5 a 20 cm e a inclinação máxima é de 45°. O mesmo possui uma aparência mais natural e permite o desenvolvimento espontâneo da vegetação. Dentre as tipologias existentes, essa é a menos dispendiosa tanto em termos de manutenção quanto de instalação (KÖHLER et al., 2002; LI; YEUNG, 2014; CHAGOLLA-ARANDA et al., 2017).

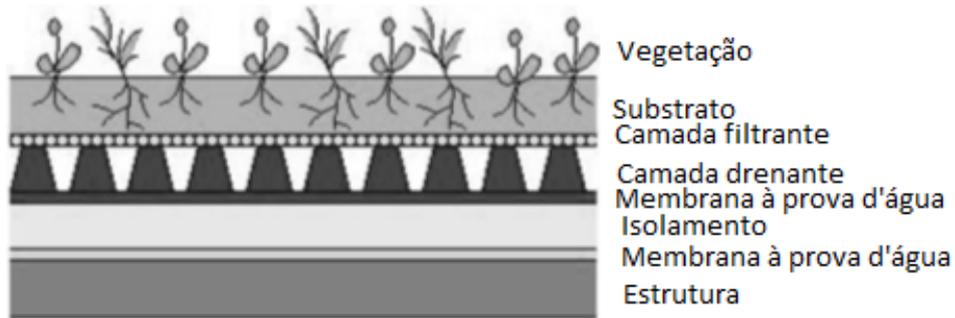
Figura 1 - Cobertura verde extensiva.



Fonte: Adaptado de American Hydrotec Inc. (2018).

Existem três tipos principais de telhado verde extensivo: completo, modular e com vegetação pré-cultivada. No sistema completo, cada componente do telhado vegetado, incluindo a camada impermeável, é instalado como uma parte integral da cobertura (Figura 2) (OBERNDORFER et al., 2007).

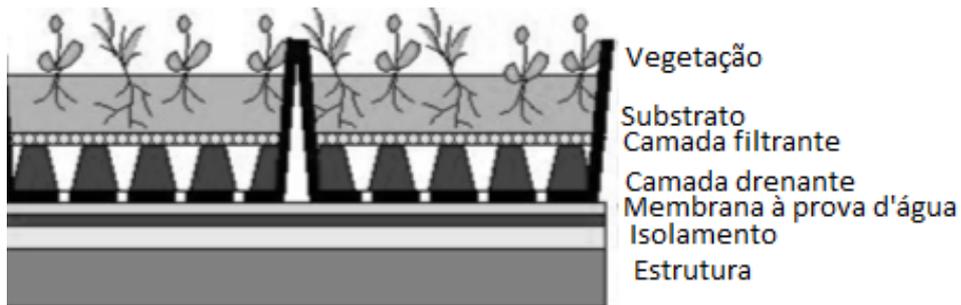
Figura 2 - Telhado extensivo completo.



Fonte: Adaptado de Oberndorfer et al. (2007).

No modular, um módulo pronto composto pela camada drenante, meio filtrante, substrato e vegetação é aplicado sobre a camada de isolamento térmico e a membrana à prova d'água previamente instaladas na cobertura (Figura 3) (OBERNDORFER et al., 2007).

Figura 3 - Telhado extensivo modular.



Fonte: Adaptado de Oberndorfer et al. (2007).

Já no caso de sistemas com a camada de vegetação cultivada previamente, todas as camadas (camada de isolamento térmico, membrana à prova d'água, camada drenante, meio filtrante e substrato), com exceção da vegetação, já estão instaladas na cobertura antes da aplicação da camada de vegetação (Figura 4) (OBERNDORFER et al., 2007).

Figura 4 - Telhado extensivo com vegetação pré-cultivada.



Fonte: Adaptado de Oberndorfer et al. (2007).

Os telhados do tipo extensivo são bem utilizados, em virtude de não necessitarem de reforço na estrutura da cobertura. Além disso, os baixos requisitos de manutenção (1 a 2 vezes por ano) e a pequena necessidade de irrigação também contribuem para sua maior implantação (NAGASE; DUNNETT, 2010; PÉREZ et al., 2015).

Contudo, a baixa espessura do substrato é um fator que pode desfavorecer o crescimento de vegetação, em função do armazenamento limitado de água, das flutuações de temperatura e da alta exposição ao vento e à radiação solar da vegetação. Por conta disso, as espécies vegetais utilizadas restringem-se a plantas rasteiras, como gramíneas e suculentas (NAGASE; DUNNETT, 2010).

As plantas do gênero *Sedum* spp. são bastante utilizadas nesse tipo de telhado, visto que promovem sombreamento adequado e suportam períodos de escassez hídrica. As mesmas pertencem ao grupo de plantas suculentas e apresentam Metabolismo Ácido das Crassuláceas (MAC), ou seja, seus estômatos abrem à noite para permitir a entrada de CO₂ e ficam fechados durante o dia para evitar a perda de água por transpiração. Além disso, essa espécie vegetal não necessita de manutenção especial e de irrigação para sobreviver (EMILSSON, 2008; LI; YEUNG, 2014).

3.1.2.2 Intensivo

Os telhados intensivos recebem essa denominação porque necessitam de manutenção frequente e uma perícia técnica eficiente (Figura 5). Esse tipo de cobertura precisa de adubação, irrigação e capina frequentes. O mesmo é bastante similar a um jardim e permite o uso de uma maior diversidade de plantas, como árvores e arbustos. Além disso, o peso desse telhado é superior a 300 kg/m² e a camada de substrato é superior a 20 cm (FERRAZ, 2012; CHAGOLLA-ARANDA et al., 2017).

Figura 5 - Cobertura verde intensiva.



Fonte: Adaptado de American Hydrotec Inc. (2018).

A utilização de telhado intensivo exige que a estrutura da cobertura seja reforçada, em virtude de seu peso elevado. Ademais, a necessidade frequente de drenagem e de irrigação onera os custos e aumenta sobremaneira a complexidade desse tipo de telhado (BERARDI, GHAFARIAN-HOSEINI, GHAFARIAN-HOSEINI, 2014).

Os telhados intensivos são mais eficientes que os extensivos em alguns aspectos, como na redução do escoamento superficial (FERRAZ, 2012). No trabalho de Kosareo e Ries (2007), os telhados extensivos reduziram em 60% o escoamento superficial, ao passo que os intensivos promoveram uma redução de 85%.

Quando são utilizados telhados dessa tipologia, recomenda-se o uso de materiais de baixo peso para compor o substrato, como perlita, zeólito e pedra-pomes, para que a carga sobre a estrutura seja atenuada (KOTSIRIS et al., 2013).

O Quadro 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens das duas tipologias já apresentadas.

Quadro 1 - Principais vantagens e desvantagens da cobertura extensiva e da intensiva.

Tipo	Vantagens	Desvantagens
Intensivo	Maior diversidade de plantas Boas propriedades isolantes Aspecto visual bastante atrativo A cobertura pode ser usada para diversos fins	Maior peso Alta necessidade de irrigação e drenagem Custo elevado Sistema de alta complexidade
Extensivo	Baixo peso Baixa manutenção Disponível para uso em projetos de <i>retrofit</i> Baixa necessidade de irrigação Desenvolvimento espontâneo de vegetação Custo relativamente baixo Aparência mais natural	Escolha limitada de plantas Não promove acesso para recreação Aspecto visual pouco atrativo

Fonte: Adaptado de Peck et al. (1999).

3.1.2.3 Semi-intensivo

Cobertura intermediária entre a intensiva e a extensiva. A espessura do substrato geralmente fica na faixa dos 12 até os 25 cm, o peso varia de 120 a 200 kg/m² e permite o uso de espécies vegetais de porte mediano (Figura 6). Comparado com o telhado extensivo pode abrigar maior diversidade de plantas e possibilita o uso da cobertura para lazer e recreação (FERRAZ, 2012; IGRA, 2010 apud UHMANN, 2016).

Figura 6 - Cobertura verde semi-intensiva.



Fonte: Adaptado de American Hydrotec Inc. (2018).

O Quadro 2 apresenta uma comparação entre os três tipos de cobertura verde apresentados.

Quadro 2 - Comparação entre a cobertura extensiva, a semi-intensiva e a intensiva.

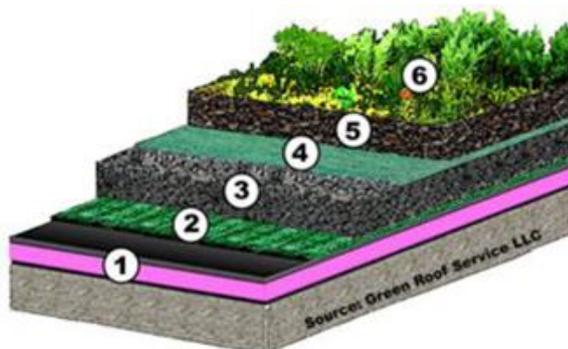
Característica	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
Espessura do substrato	Inferior a 20 cm	De 12 a 25 cm	Superior a 20 cm
Peso	60-150 kg/m ²	120-200 kg/m ²	Superior a 300 kg/m ²
Tipo de vegetação	<i>Sedum</i> spp., herbáceas e espécies de relva, como <i>Aracahis repens</i> e <i>Zoysia japonca</i> .	Arbustos e herbáceas, como <i>Bulbine frutescens</i> e <i>Impatiens walleriana</i> .	Arbustos e árvores
Irrigação	Nem sempre é necessária	Necessidade mediana	Há necessidade de sistemas de irrigação e drenagem
Utilização	Proteção e funções ecológicas	Biodiversidade, lazer	Lazer, convívio
Manutenção	Simples	Média	Complicada
Custo	Baixo	Médio	Elevado

Fonte: Adaptado de Lorenzi e Souza (2008) e Silva (2014).

3.1.3 Detalhes construtivos

O sistema construtivo de um telhado com vegetação precisa ser composto minimamente por alguns elementos, independentemente do tipo adotado. De maneira geral, os componentes principais de um telhado vegetado são a camada impermeabilizante, a camada drenante, a camada filtrante, o substrato e a vegetação (CHAGOLLA-ARANDA et al., 2017). Os elementos básicos estão detalhados na Figura 7.

Figura 7 - Constituição típica de uma camada de telhado verde.



Fonte: Green Roof (2008).

A Figura 7 apresenta os seguintes componentes construtivos:

1. Estrutura do telhado;
2. Camada de proteção / impermeabilizante;
3. Camada de drenagem;
4. Camada filtro;
5. Substrato;
6. Vegetação.

Os procedimentos necessários para a instalação do telhado verde devem ser realizados por empresas especializadas. Vale ressaltar que os telhados intensivos são os que necessitam de maiores cuidados no momento da instalação (CATUZZO, 2013).

Com relação à estrutura do telhado verde, a mesma pode ser constituída por diferentes tipos de materiais, como laje de concreto, madeira, bambu, telha metálica, chapa de compensado estruturado, chapa OSB estrutural, *steel deck*, placa cimentícia, entre outros, desde que seja impermeabilizada e resista à carga da cobertura. Vale ressaltar que as instalações que fazem parte do telhado devem ser colocadas de forma a facilitar a manutenção e causar o mínimo de interferência (FERRAZ, 2012; SAVI, 2015).

Para o dimensionamento correto do sistema, são utilizadas as seguintes normas: NBR 6118 (ABNT, 2014), que versa sobre o projeto de estrutura de concreto; NBR 6120 (ABNT, 1980), que trata sobre as cargas para o cálculo de estruturas de edificações e NBR 7190 (ABNT, 1997), que se refere à verificação da inclinação mínima, carga mínima de suporte e outras informações relativas a estruturas de madeira (SAVI, 2015).

A camada impermeabilizante, por sua vez, tem a função de proteger a estrutura contra infiltrações e é geralmente composta por materiais termoplásticos. Vale ressaltar que deve haver compatibilidade entre a impermeabilização escolhida e a estrutura do telhado, para evitar patologias no futuro. Antes da aplicação das demais camadas, a estanqueidade da camada impermeabilizante deve ser testada (LUCKETT, 2009; SAVI, 2015).

Vale ressaltar que a impermeabilização deve possuir projeto específico, para que não entre em conflito com outros projetos. De forma geral, os materiais mais utilizados para a impermeabilização são as membranas e as mantas. As membranas são moldadas no local e são mais vantajosas para coberturas de formatos complexos. Já as mantas são previamente fabricadas e apresentam largura e espessura fixas. Ambas podem apresentar natureza polimérica ou asfáltica (MENDES, 2014).

No caso específico de lajes de concreto armado, o material mais comumente utilizado para impermeabilização é a manta asfáltica. Já para estruturas compostas por placas de madeira, pode-se utilizar manta de polietileno de alta densidade (PEAD) ou borracha líquida (SAVI, 2015).

Caso a camada impermeabilizante não apresente proteção antirraízes, deve ser adicionada uma camada adicional que cumpra essa função, que geralmente é constituída de tecido ou de plástico térmico. Essa camada de proteção pode ter dois princípios de funcionamento: o físico ou o químico. O físico ocorre quando a camada possui uma malha muito fina, impedindo as raízes de atravessá-la. O químico, por sua vez, acontece quando a camada apresenta um composto químico que repele ou destrói a raiz, como lâmina de cobre ou alcatrão (LUCKETT, 2009; LAMBERTS et al., 2010; MENDES, 2014).

Já a camada drenante tem como função remover o excesso de água quando o substrato ficar saturado e armazenar água nos períodos de seca. A espessura dessa camada varia em função da profundidade do substrato. Pode ser composta por agregados graúdos, painéis de espuma absorvente, geotêxteis, argila expandida, pedra-pomes, materiais reciclados de escória ou materiais à base de poliestireno (MINKE, 2005; LUCKETT, 2009; LAMBERTS et al., 2010).

O substrato, por sua vez, funciona como base para o telhado verde e deve propiciar uma ancoragem firme das raízes de modo a garantir o crescimento adequado da vegetação. A camada de substrato costuma ser majoritariamente mineral com pequenas parcelas de matéria

orgânica. Essa camada pode ser constituída por solo, resíduos agrícolas ou industriais. Se for utilizado solo, deve-se evitar solo argiloso, para que a drenagem não seja prejudicada (OBERNDORFER et al., 2007; LAMBERTS et al., 2010; LI; YEUNG, 2014).

É importante salientar que a espessura do substrato influencia o tipo de vegetação que será utilizada. Caso a espessura esteja compreendida entre 2 e 5 cm, há maior probabilidade de as espécies vegetais apresentarem dessecação e estarem sujeitas a flutuações de temperatura. No caso de espessuras entre 7 e 15 cm, o substrato pode abrigar maior variedade de plantas, inclusive ervas daninhas, o que pode causar problemas (OBERNDORFER et al., 2007).

De acordo com Savi (2015), substratos que possuem grande quantidade de nutrientes podem exercer efeitos negativos, principalmente em telhados extensivos, pois esses nutrientes em excesso podem propiciar o crescimento muito rápido da vegetação, o que aumenta a demanda por manutenção.

Vale ressaltar que para substratos constituídos por solo, deve-se prover uma camada geotêxtil filtrante. Essa camada filtro faz a separação entre o substrato e a camada de drenagem e tem a função de reter as partículas de menor dimensão (MORAIS, 2004; LAMBERTS et al., 2010).

Já com relação à camada de vegetação, deve-se conhecer o clima da região, o tipo de material do substrato e a estrutura de suporte antes de escolher a vegetação a ser utilizada. Deve-se dar preferência às espécies vegetais nativas da região. Ademais, vale salientar que as plantas devem suportar a exposição aos ventos dominantes, aos raios solares, às geadas e a outros fenômenos naturais (MORAIS, 2004; LAMBERTS et al., 2010).

Além disso, as condições climáticas, como o índice pluviométrico e as temperaturas extremas, restringem a parcela de plantas que podem ser utilizadas. Vale ressaltar que apesar de ser recomendado o uso de plantas nativas para os telhados verdes, muitas delas não podem ser utilizadas em coberturas extensivas, em virtude da baixa espessura do substrato desse tipo de telhado (OBERNDORFER et al., 2007).

De forma geral, as características da vegetação que mais influenciam a transferência de calor da cobertura para o interior da edificação são as dimensões da espécie vegetal, o índice de área foliar (IAF), a cobertura fracionária, o albedo e a resistência estomática. Além

desses fatores principais, a orientação da folha e o fator de forma também exercem influência (ALEXANDRI; JONES, 2007; SAILOR, 2008; SCHWEITZER; ERELL, 2014).

O IAF depende da densidade da folhagem, das características geométricas e da altura da planta e geralmente situa-se no intervalo de 0,5-5,0. Já a cobertura fracionária mede a fração do telhado que é coberto por pelo menos uma folha inteira. O albedo, por sua vez, indica a refletividade da vegetação quando a luz solar incide sobre a mesma. Já a resistência estomática mede a taxa de transpiração da planta (ALEXANDRI; JONES 2007; SAILOR, 2008; PÉREZ et al., 2015).

Segundo Lorenzi e Souza (2008), algumas espécies podem ser utilizadas em coberturas verdes no Brasil, como *Aptenia cordifolia* (rosinha-do-sol), *Aracahis repens* (amendoim-rasteiro), *Bulbine frutescens* (bulbine), *Dichondra repens* (dicondra), *Evolvulus pusillus* (gota-de-orvalho), *Festuca glauca* (grama azul), *Impatiens walleriana* (maria-sem-vergonha), *Lampranthus productus* (cacto-margarida), *Ophiopogon japonicus* (grama preta), *Paspalum notatum* (grama-batatais), *Sedum multiceps* (estrelinha-gorda), *Spilanthes repens* (margarina rasteira), *Stenotaphrum secundatum* (grama inglesa) e *Zoysia japonica* (grama esmeralda).

Se por razões construtivas não for possível utilizar solo na composição do substrato do telhado, podem-se utilizar plantas trepadeiras na camada de vegetação, visto que essas espécies se adaptam a situações adversas e possuem grande capacidade de se apoiar em estruturas (MINKE, 2005; CHAMBEL, 2018).

Nagase e Dunnett (2010) avaliaram a tolerância à seca de diferentes espécies vegetais empregadas em telhados extensivos. Os autores concluíram que o uso de vários tipos de vegetação na cobertura foi mais eficiente do que utilizar apenas uma espécie. Além disso, os mesmos afirmaram que caso sejam utilizadas plantas do gênero *Sedum* spp., não é necessário irrigação, visto que essa espécie vegetal pode suportar até 3 semanas sem água.

Chagolla-Aranda et al. (2017) analisaram várias espécies vegetais comumente utilizadas em telhados verdes e suas respectivas necessidades de irrigação. Dentre as plantas estudadas, a espécie *Aeonium subplanum* (cactácea) foi a que apresentou maior tolerância à falta de água e a *Sedum makinoi* (suculenta) foi a que mostrou maior necessidade de ser irrigada.

Morau, Libelle e Garde (2012) avaliaram o desempenho térmico de telhados verdes formados por diferentes tipos de espécies vegetais: *Plectranthus neochilus*, *Kalanche thyrsiflora* e *Sedum reflexum*. Os autores concluíram que a cobertura verde composta pela espécie *Sedum reflexum* foi a que apresentou o melhor desempenho térmico dentre as três espécies analisadas.

De acordo com Lockett (2009), a escolha do tipo de vegetação é bastante importante, pois diferentes espécies vegetais provocam sobrecargas distintas à cobertura. As plantas do gênero *Sedum* spp. e as demais suculentas causam um aumento de pressão no telhado de 95,76 Pa, as gramíneas e os arbustos pequenos provocam uma sobrecarga de 143,64 Pa e os arbustos maiores geram uma pressão de 191,52 Pa.

Dessa forma, é importante que as recomendações elencadas sejam cumpridas para que todo o sistema da cobertura verde possa atender aos requisitos exigidos e cumprir as funções para as quais foram projetadas. Além disso, as condições climáticas da região não devem ser menosprezadas para que o desempenho do telhado verde seja maximizado (LAMBERTS et al., 2010).

3.1.4 Influência dos telhados verdes no ambiente construído

A implantação de telhados verdes proporciona inúmeros benefícios estéticos, econômicos e ambientais à edificação. Dentre as vantagens estéticas, pode-se citar a criação de áreas de lazer nos centros urbanos e a melhoria do aspecto estético da cobertura (DUNNETT, 2005 apud AGUIAR; FEDRIZZI, 2010).

Nos centros urbanos, onde o acesso das pessoas a áreas verdes é bastante limitado, as coberturas vegetadas criam ambientes visualmente agradáveis, que podem servir para descanso e meditação, diminuindo os níveis de estresse da população (PECK et al., 1999; HUANG, CHEN, LIU, 2018).

Além disso, o uso de vegetação sobre as coberturas pode ser a solução para melhorar o aspecto estético dos telhados comerciais, industriais e residenciais. Assim, jardins plantados sobre o topo de edificações tornam-se espaços que possibilitam o plantio de diversas espécies vegetais, promovendo a melhoria do aspecto estético (AGUIAR; FEDRIZZI, 2010).

Dentre os benefícios de ordem econômica, tem-se o aumento da vida útil da cobertura e a diminuição do consumo de energia elétrica para resfriamento do ambiente, visto que o uso de telhados verdes atenua as temperaturas internas da edificação (SILVA, 2014).

Em coberturas verdes, a camada de vegetação protege a camada impermeabilizante da cobertura contra a ação da radiação solar, aumentando a vida útil da coberta. Em edificações europeias, a camada de impermeabilização das coberturas tradicionais suporta variações de temperatura de até 100 °C ao longo do ano, o que contribui para diminuir a vida útil das mesmas. Caso a cobertura fosse vegetada, a variação térmica seria da ordem de apenas 30 °C. (MINKE, 2005).

Além disso, os telhados verdes também propiciam economia de energia elétrica para resfriamento, visto que o ar presente na camada de vegetação atua como isolante térmico e a combinação entre o solo e a planta reduz a absorção de calor pela cobertura (EUMORFOPOULOU; ARAVANTINOS, 1998; SILVA, 2014).

Niachou et al. (2001) estudaram o efeito do telhado verde sobre o gasto energético de uma edificação. O trabalho foi realizado em duas fases: na primeira, as temperaturas internas e externas foram medidas e, na segunda, a economia de energia foi avaliada através de uma abordagem matemática. Durante o período de estudo, a economia de energia propiciada pelo telhado vegetado chegou a 37%.

Zhao e Srebric (2012) analisaram o desempenho de coberturas vegetadas sob as condições de inverno. As construções com telhados verdes apresentaram uma economia de 22,9% no consumo energético em comparação com aquelas que possuíam telhados convencionais sem a presença de neve no topo. Quando havia a presença de neve, a economia de energia era de apenas 5,2%.

As coberturas vegetadas também são bastante eficientes em reduzir o ganho de calor de uma edificação tanto em climas quentes quanto em climas mais frios, em razão dos mecanismos fisiológicos das plantas como a fotossíntese e a evapotranspiração. Através desses mecanismos, a vegetação extrai calor do meio em que está inserida. Além disso, a evapotranspiração da planta também promove o aumento da umidade do ar, contribuindo para amenizar a temperatura (MINKE, 2005; CASTLETON et al., 2010).

Em climas quentes, há amenização da temperatura interna, visto que as espécies vegetais na cobertura formam uma barreira à ação da radiação solar direta e propiciam sombreamento. No caso de climas frios, apesar dos benefícios proporcionados pelas coberturas vegetadas, alguns autores afirmam que pode haver efeitos negativos quando essa estratégia é utilizada, visto que ocorre atenuação da temperatura interna da edificação, o que

não é bem-vindo nesse caso (BERARDI, GHAFARIAN-HOSEINI, GHAFARIAN-HOSEINI, 2014).

A cobertura verde promove a estabilidade da temperatura durante o dia e à noite. De forma geral, as temperaturas internas de uma edificação com esse tipo de cobertura são mais elevadas à noite e mais baixas durante o dia, visto que o calor é dissipado de forma mais lenta pelas camadas da cobertura verde (SAVI, 2015).

Vale ressaltar que a camada de vegetação protege a cobertura da radiação solar incidente por meio de três mecanismos principais: reflexão, evaporação da umidade do substrato e da vegetação e convecção da energia absorvida pelas plantas. Levando-se em consideração a radiação solar total, 27% é refletida pela vegetação, 13% transmitida ao solo e 60% é absorvida pelas plantas e pelo substrato (EGGENBERGER, 1983 apud EUMORFOPOULOU; ARAVANTINOS, 1998).

É importante salientar que a capacidade da vegetação produzir sombreamento pode ficar reduzida em algumas épocas específicas, como durante os períodos de crescimento da planta e de escassez de água ou quando a vegetação é acometida por alguma fitopatologia (PÉREZ et al., 2015).

Segundo Berardi et al. (2014), o solo funciona como uma massa inerte com elevada capacidade térmica e baixa transmitância térmica dinâmica e a vegetação absorve uma parcela da energia térmica para seus processos vitais. Logo, ambas as camadas induzem o resfriamento evaporativo.

Com relação às vantagens ambientais, pode-se citar a atenuação dos efeitos advindos das ilhas de calor, a redução da poluição do ar, a diminuição da poluição sonora e o aumento do isolamento térmico, a retenção das águas pluviais e a preservação ecológica (SILVA, 2014).

A implantação de coberturas verdes pode atenuar os efeitos da ilha de calor, que é uma anomalia térmica em que a temperatura da área urbana é superior à temperatura da área rural e das regiões circunvizinhas (FERRAZ, 2012). De acordo com Lombardo (1985) apud Catuzzo (2013), o processo de urbanização altera o clima local, em virtude da modificação na cobertura vegetal do solo e da concentração de edifícios que interferem nos ventos. Conseqüentemente, a temperatura da região central tende a ser mais elevada que das áreas circunvizinhas.

Smith e Roeber (2011) analisaram os efeitos das coberturas verdes sobre a ilha de calor na cidade de Chicago por meio do uso da ferramenta *Weather Research and Forecasting (WRF) Model*, que é um sistema desenvolvido para pesquisa atmosférica. Os autores observaram que a adoção do uso de telhados verdes reduziu a temperatura no ambiente urbano em até 3° C.

Além disso, a instalação de telhados verdes nas cidades melhora sobremaneira a qualidade do ar, visto que as plantas filtram partículas de sujidade oriundas do ar, consomem o dióxido de carbono e removem os metais pesados e outras partículas poluentes (MINKE, 2005; SILVA, 2014).

Currie e Bass (2008) pesquisaram a influência de coberturas e paredes verdes na diminuição da poluição do ar em Toronto. Os autores concluíram que a presença de árvores nos telhados verdes contribuiu grandemente para a redução da poluição do ar, mas a implantação de arbustos e gramíneas nas coberturas também atenuou a poluição aérea.

Yang, Yu e Gong (2008) quantificaram a redução no nível de poluição do ar obtido pela implantação de telhados verdes em Chicago. O estudo indicou que a instalação de 19,8 ha de telhados vegetados reduziu 1675 kg de poluentes do ar no período de um ano. Além disso, a redução chegaria a 2046,89 toneladas se todas as coberturas da cidade tivessem vegetação.

O aumento do isolamento sonoro é outra vantagem oriunda da implantação de telhados verdes na edificação, visto que o conjunto formado pelo substrato e a vegetação atua como um isolamento sonoro de boa qualidade. As plantas reduzem o ruído através de fenômenos como absorção (transformação da energia sonora em energia cinética), reflexão e deflexão, além de bloquearem as ondas de frequência alta. Já o substrato absorve as ondas sonoras de baixa frequência (MINKE, 2005; SILVA, 2014).

O trabalho de Connelly e Hodgson (2011) avaliou em laboratório a absorção e a transmissão sonora de telhados vegetados e chegou à conclusão de que esse tipo de cobertura diminuiu consideravelmente o ruído. De acordo com o *International Green Roof Association (IGRA)* (2013) apud Catuzzo (2013), os telhados verdes podem melhorar o isolamento sonoro em até 8 decibéis (dB) e reduzir a reflexão sonora em até 3 dB.

Além disso, esse tipo de cobertura promove retenção das águas pluviais, o que ajuda a amenizar a ocorrência de cheia nos meios urbanos. O grande número de construções com

área impermeável implica problemas no escoamento superficial das águas pluviais, uma vez que os sistemas de drenagem, muitas vezes, não são dimensionados corretamente ou não passam pela manutenção necessária (SILVA, 2014).

Os telhados verdes também podem ajudar a melhorar a gestão do risco de cheias, visto que quando a precipitação acontece, grande parte da água precipitada é armazenada no substrato, parte é evapotranspirada pela vegetação e o restante escoado para o sistema de drenagem. Portanto, as coberturas vegetadas auxiliam a reduzir a frequência dos eventos de inundação e retardam o fluxo de águas pluviais (PECK et al., 1999; CUNHA, 2004 apud LOPES, 2007).

Vale ressaltar que a redução do escoamento superficial depende do sistema de cobertura, da espessura do substrato, da vegetação adotada e da época do ano e pode alcançar valores de 70 a 80% no verão e de 25 a 40% no inverno (EFB, 2014 apud SILVA, 2014). Segundo Peck et al. (1999), a taxa de retenção das águas pluviais varia entre 70 a 100% no verão e entre 40 a 50% no inverno. Já o trabalho de Van Woert et al. (2005) citado por Berardi, Ghaffarian-Hoseini e Ghaffarian-Hoseini (2014) encontrou valores de redução do escoamento superiores a 80%.

Outra vantagem oriunda do uso de telhados verdes é o aumento da biodiversidade, visto que os telhados vegetados podem abrigar grande diversidade de pássaros, insetos, outros animais de pequeno porte e vegetais, com o consequente aumento da biodiversidade urbana. Os telhados intensivos conseguem abrigar um número maior de espécies animais em comparação com os extensivos, visto que apresentam maior variedade de vegetação (JOBIM, 2013; BERARDI, GHAFFARIAN-HOSEINI, GHAFFARIAN-HOSEINI, 2014).

Além disso, a implantação de vegetação no topo dos edifícios promove o aumento de áreas verdes nos centros urbanos (SILVA, 2014). De acordo com Minke (2005), as coberturas verdes com substrato de aproximadamente 15 cm de espessura e camada de vegetação de 10 a 20 cm de espessura abrigam de 5 a 10 vezes mais vegetação do que um parque urbano de mesma área.

Apesar das inúmeras vantagens elencadas, a adoção de coberturas verdes também pode oferecer desvantagens. Uma das principais desvantagens proporcionadas é o aumento da carga na estrutura do edifício, o que pode impossibilitar a utilização dessa solução em um edifício já construído. Vale ressaltar que a estimativa de peso da cobertura deve levar em consideração o estado inundado da mesma durante o período chuvoso (SILVA, 2014).

O investimento inicial elevado e o custo de manutenção, a depender do tipo de telhado verde, também são desvantagens, visto que há necessidade de contratação de uma equipe qualificada para a execução e a manutenção desse sistema. Ademais, outro fator relacionado ao aumento das despesas dos telhados vegetados é o consumo de água em coberturas que necessitem de um sistema de irrigação (SILVA, 2014; SILVEIRA et al., 2016).

Portanto, mesmo possuindo desvantagens, como as maiores necessidades de investimento inicial, os benefícios advindos pela implantação de coberturas vegetadas sobrepujam sobremaneira os aspectos negativos. Dessa maneira, torna-se importante que haja uma mudança de mentalidade por parte dos profissionais e empresas para que a instalação desse tipo de cobertura seja cada vez mais efetiva (SILVA, 2014).

3.1.5 Legislação e políticas de incentivo

No mundo inteiro, existem várias leis que incentivam a adoção de coberturas verdes como forma de diminuir o consumo de energia das edificações. Tais políticas consistem em incentivos financeiros ou em redução de impostos. Vale ressaltar que a adoção de telhados com vegetação contribui para que a edificação possa adquirir certificações, como a *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e a *Building Research Establishment* (BREEAM) (BERARDI, GHAFARIAN-HOSEINI, GHAFARIAN-HOSEINI, 2014).

Na Suíça, o governo promove o uso de coberturas vegetadas por meio da concessão de incentivos financeiros e subsídios, tanto para prédios públicos quanto privados. Já nos Estados Unidos, existem Planos Diretores nas cidades de Chicago e de Nova York que recomendam a instalação de telhados verdes em edifícios (AGUIAR; FEDRIZZI, 2010).

Na Espanha, por sua vez, existem duas normas tecnológicas para os telhados verdes: a NTJ-11E (1999) *Jardineria i Paisatgisme para Cobertes Ecològiques Extensives* e a NTJ-11I (2000) para *Cobertes Enjardinades Intensives*, que são utilizadas para o projeto, a construção e a manutenção de coberturas verdes. Para cada tipologia de telhado vegetado, essas normas definem padrões construtivos, com relação à espessura do substrato e ao peso da camada de vegetação (CATUZZO, 2013).

Em Tóquio, é obrigatória a instalação de coberturas vegetadas em construções particulares com área superior a 1000 m² e em públicas com área maior que 250 m². Em

Toronto, por sua vez, há políticas específicas com o sentido de obrigar a inserção de vegetação em pelo menos 50% da cobertura (BERARDI, GHAFARIAN-HOSEINI, GHAFARIAN-HOSEINI, 2014).

Na América Latina, existem estudos do governo do México para a implantação de leis que regulamentem e incentivem a instalação de coberturas verdes e na Argentina, foi lançado o Projeto *Cubiertas Verdes*, que consistiu no incentivo à implantação de telhados vegetados em edifícios públicos e privados (AGUIAR; FEDRIZZI, 2010).

Apesar dos incentivos existentes, ainda há muitos desafios concernentes ao uso de vegetação na cobertura. Esses desafios podem ser devidos a diversos fatores como o desconhecimento dessa técnica pela população, a resistência do mercado, as expectativas de custo elevado pelos engenheiros e arquitetos, entre outros (ALMEIDA et al., 2018).

No Brasil, ainda não existe uma norma específica para a instalação de telhados vegetados e a única que normatiza cargas estruturais é a NBR 6120 (ABNT, 2000), que dispõe sobre as cargas para o cálculo da estrutura das edificações.

No tocante ao desempenho térmico de edificações brasileiras, há a NBR 15520 (ABNT, 2005), que é dividida em cinco partes: I- definições e conceitos, II - metodologia de cálculo, III - zoneamento bioclimático, IV - métodos de medição de desempenho térmico dos componentes pelo princípio da placa quente protegida e V - método de medição de desempenho térmico pelo método fluximétrico.

Na terceira parte, constam as diretrizes construtivas que devem ser adotadas para cada uma das oito zonas bioclimáticas em que o Brasil está dividido, como forma de propiciar a melhoria do desempenho térmico das edificações. A referida NBR recomenda o uso de estratégias bioclimáticas de resfriamento evaporativo e de massa térmica para resfriamento, como a instalação de telhados verdes, nas Zonas Bioclimáticas 4, 6 e 7.

Em 2011, foi elaborado, no Brasil, o Projeto de Lei n° 1703/2011, que ainda está em tramitação e que dispõe sobre a instalação de telhado verde. De acordo com o referido Projeto de Lei, os projetos de condomínios verticais, que possuam mais de três unidades agrupadas, terão a obrigação de prever a instalação de telhados vegetados. O mesmo pode ser do tipo intensivo ou extensivo e deverá possuir pelo menos as seguintes camadas: impermeabilização, proteção contra raízes, drenagem, filtro, substrato e vegetação (BRASIL, 2011).

Em Santa Catarina, foi elaborada a Lei nº 14243/2007, que dispõe sobre a implantação de telhados verdes no referido Estado. Conforme a lei, a área utilizada para a instalação do telhado vegetado não pode ser inferior a 40% da área total da cobertura. Ademais, ficou autorizada a concessão de incentivos fiscais e financeiros aos municípios catarinenses que adotarem esse tipo de cobertura (SANTA CATARINA, 2007).

Na cidade de São Paulo, existe a Lei nº 16277/2015, que dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação de telhado verde. De acordo com a lei citada, o telhado vegetado deverá ser composto por vegetação compatível com o local e que exija pouca manutenção. Além disso, o Poder Executivo promoverá a realização de palestras e cursos para a divulgação das técnicas necessárias para a instalação desse tipo de cobertura (SÃO PAULO, 2015).

No caso de Recife, foi promulgada a Lei nº 18112/2015, que dispõe sobre a obrigatoriedade de instalação de telhado verde com o intuito de promover a melhoria da qualidade ambiental das edificações. De acordo com a referida lei, os projetos de edificações não habitacionais com área coberta superior a 400 m² e construções residenciais com mais de quatro pavimentos deverão prever a instalação de telhados vegetados (RECIFE, 2015).

Logo, percebe-se que inúmeros países, principalmente os mais desenvolvidos economicamente, estão estimulando cada vez mais na implantação desse tipo de cobertura, sejam por meio de incentivos financeiros ou por meio da criação de leis e projetos que tornam essa implantação obrigatória.

3.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Através de simulações computacionais, pode-se avaliar o desempenho termoenergético de projetos e de edifícios, com o intuito de identificar possíveis falhas existentes e auxiliar na escolha das estratégias mais eficazes. Entretanto, essa prática não é muito comum em escritórios de projetos, em virtude da complexidade que os programas apresentam (TORRES, 2015).

Grande parte dos programas de simulação termoenergética são de origem estrangeira, como DOE 2.1.E, *EnergyPlus*®, TRNSYS, BLAST, TAS, eQUEST, *PowerDomus*, entre outros. Já no Brasil, foram desenvolvidos os seguintes *softwares*: DOMUS, ACTERM, COBRA e ARQUITROP. Atualmente, o *EnergyPlus*® é um dos programas de simulação

termoenergética mais utilizados pelos profissionais (SORGATO, 2009; TORRES, 2015) e por conta disso, foi o escolhido para realizar as simulações nesse trabalho.

O *EnergyPlus*® tem suas raízes em *softwares* como BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2. O referido *software* é utilizado para simular o comportamento termoenergético de uma edificação e é um dos mais novos e avançados programas de simulação termoenergética. De forma geral, permite calcular e prever as temperaturas interiores, os fluxos de calor, o consumo energético, entre outros (SAILOR, 2008; SILVA, 2014; DOE, 2016).

A simulação no *EnergyPlus*® só se torna possível com a definição dos parâmetros que o programa necessita, que são preenchidos no *IDF-Editor*, que é acessado a partir do *EP-Launch*. Uma das principais limitações do programa é o fato de não apresentar uma interface gráfica, o que dificulta a definição da geometria do modelo do edifício. Com o intuito de ultrapassar esse obstáculo, utiliza-se o *software Sketchup*® para a modelagem da edificação e por meio do *plugin Euclid*®, os campos de entrada concernentes à geometria são preenchidos no *EP-Launch* (SILVA, 2014).

O *EnergyPlus*® é composto por vários campos de entrada, que estão especificados no Quadro 3. A depender do objetivo da simulação, nem todos os parâmetros são preenchidos, visto que, muitas vezes, não são relevantes para os objetivos da simulação.

Quadro 3 - Descrição dos grupos do *EnergyPlus*®.

Grupo	Descrição
<i>Simulation Parameters</i>	Parâmetros gerais: versão do programa, tipo de simulação, posição da construção etc.
<i>Location and Climate</i>	Aspectos climáticos e de localização: período de simulação, temperatura dos dias de projeto etc.
<i>Schedules</i>	Definição de horários de utilização: horário de ocupação, tempo de funcionamento de equipamentos etc.
<i>Surface Construction Elements</i>	Especificação dos materiais e dos componentes construtivos da envoltória e dos compartimentos internos.
<i>Internal Gains</i>	Detalhamento dos ganhos internos associados ao metabolismo dos ocupantes, aos equipamentos e a dispositivos de iluminação.
<i>Thermal Zones and Surfaces</i>	Caracterização das características geométricas, das zonas térmicas e das massas internas.
<i>Zone Airflow</i>	Discriminação da renovação do ar, seja natural ou mecânica, do edifício.
<i>HVAC Template</i>	Indicação do funcionamento do aparelho de ar-condicionado da edificação.
<i>Output Reporting</i>	Relatório das saídas obtidas com as simulações.

Fonte: Silva (2014).

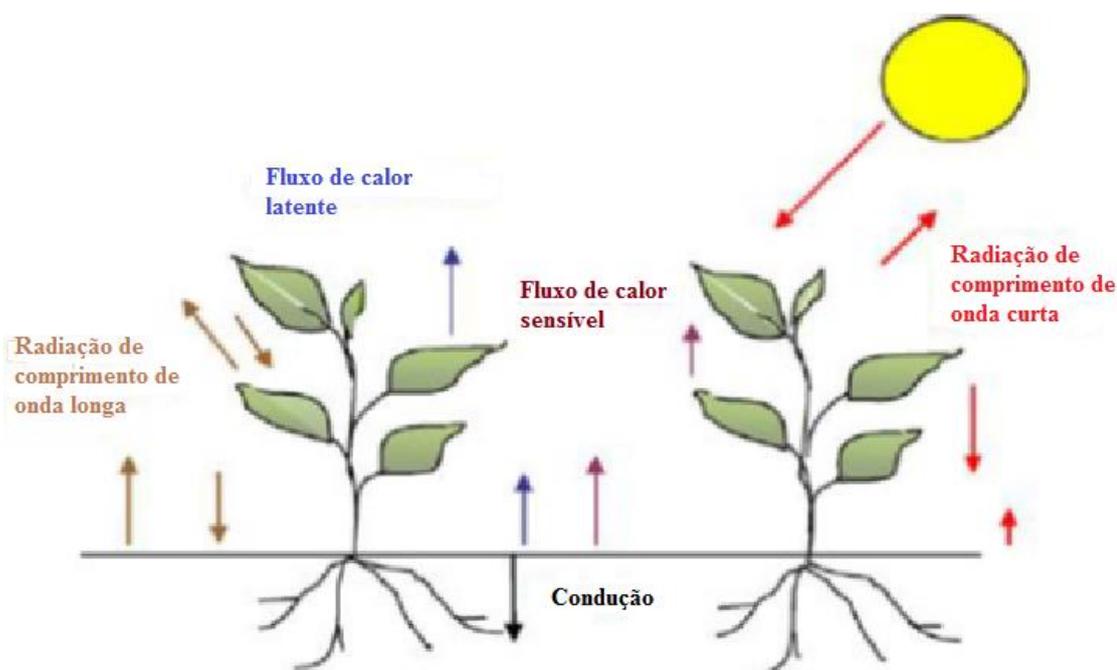
A modelagem de telhados vegetados permite simular os efeitos desse tipo de cobertura na edificação. A existência limitada de ferramentas de dimensionamento de coberturas vegetadas propiciou o desenvolvimento de um módulo de telhado verde por Sailor, que foi incorporado ao *EnergyPlus*® no campo de entrada *Material: Roof Vegetation* (SAILOR, 2008; SILVA, 2014).

O modelo possibilita a simulação do balanço termoenergético da cobertura vegetada e traduz os efeitos da evapotranspiração, das trocas de radiação do substrato com a vegetação e do sombreamento. Além disso, permite explorar diversas características das camadas constituintes desse tipo de telhado, como a espessura do substrato e o tipo de vegetação empregada (SAILOR, 2008).

De acordo com Sailor (2008), como a umidade do solo varia a depender do período do dia e da estação do ano e como o albedo da cobertura vegetada é altamente dependente da taxa de umidade do solo, a modelagem dos telhados verdes deve levar em consideração essas mudanças de umidade e as consequentes variações nas propriedades térmicas, como também o albedo da vegetação da cobertura.

Vale ressaltar que as trocas de calor em uma cobertura verde dependem da radiação solar (Figura 8). Já o balanço de energia desse tipo de telhado depende da absorção de radiação solar, do fluxo de calor sensível (convecção) e latente (evaporação) do solo e das plantas, juntamente com as trocas de radiação entre as camadas e a transferência de calor para o solo (SILVA, 2014).

Figura 8 - Representação simplificada do balanço de energia em um telhado verde.

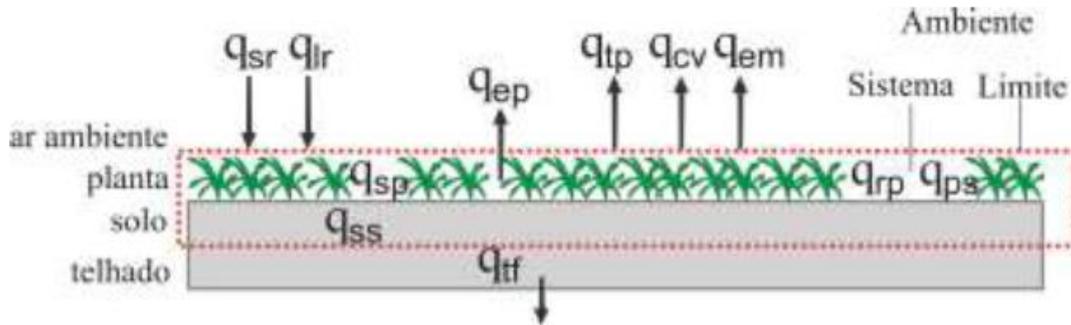


Fonte: Adaptado de Sailor (2008).

A taxa de transferência de calor de um telhado vegetado é diferente da que acontece em uma cobertura convencional, uma vez que os fatores climáticos externos, como radiação solar e temperatura externa, são atenuados em função da presença da vegetação da cobertura (EUMORFOPOULOU; ARAVANTINOS, 1998).

Considerando as plantas e o solo como o sistema e o telhado e o ar como o ambiente, as trocas de energia entre o sistema e o meio ambiente ocorrem como ilustrado na Figura 9 (FENG, MENG, ZHANG, 2010).

Figura 9 - Troca de energia entre o telhado verde e o ambiente.



Fonte: Rosseti (2013).

Levando-se em consideração a Primeira Lei da Termodinâmica, tem-se a **Equação 1**, que representa a equação do balanço de energia de uma cobertura vegetada. Os valores positivos representam ganhos e os negativos representam perdas (FENG, MENG, ZHANG, 2010).

$$q_{sr} + q_{lr} + q_{cv} - q_{em} - q_{tp} - q_{ep} - q_{sp} - q_{ss} - q_{tf} - q_{ps} + q_{rp} = 0 \quad (1)$$

Em que:

q_{sr} : ganho de calor por radiação solar [W/m^2];

q_{lr} : ganho de calor através de radiação de ondas longas [W/m^2];

q_{cv} : transferência de calor por convecção [W/m^2];

q_{em} : perda de calor por emissão [W/m^2];

q_{tp} : perda de calor por transpiração [W/m^2];

q_{ep} : perda de calor por evaporação [W/m^2];

q_{sp} : armazenamento de calor pelas plantas [W/m^2];

q_{ss} : armazenamento de calor pelo solo [W/m^2];

q_{tf} : calor transferido para o edifício [W/m^2];

q_{ps} : energia solar convertida pelo processo de fotossíntese [W/m^2];

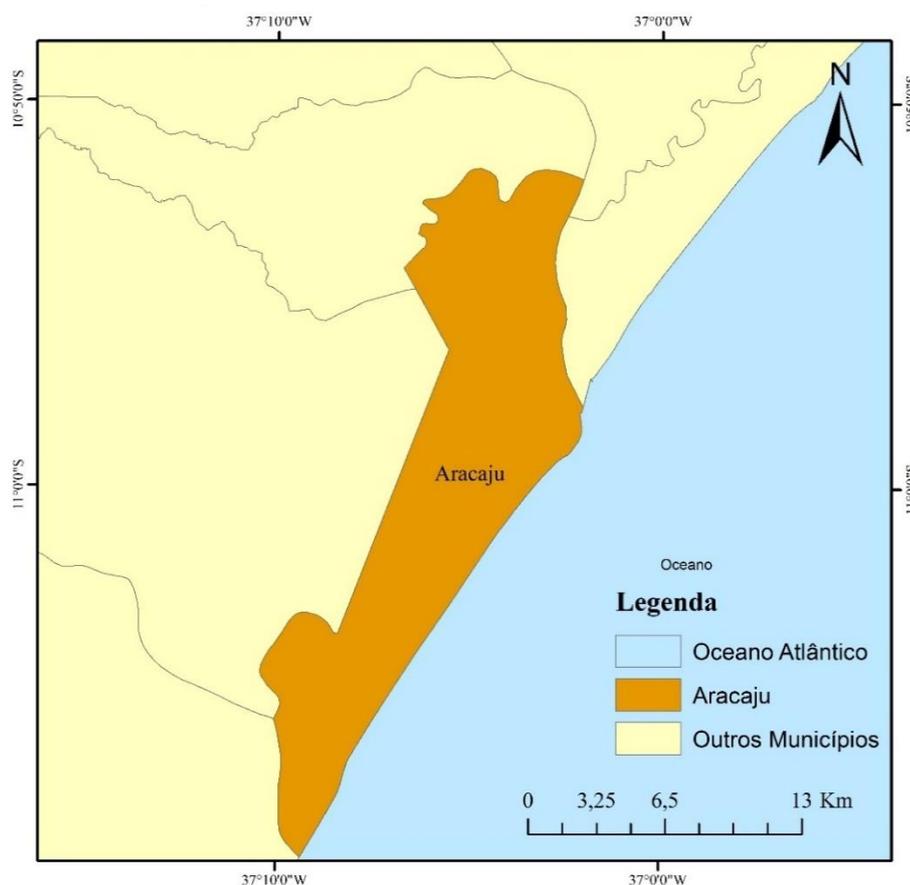
q_{rp} : geração de calor pela respiração [W/m^2].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Aracaju, capital do Estado de Sergipe, foi a área de estudo escolhida para o presente trabalho (Figura 10). O município está inserido na mesorregião do Leste Sergipano e está localizado entre as coordenadas geográficas de 10°55'56" de latitude Sul e 37°04'23" de longitude Oeste. Limita-se ao sul com o Rio Vaza-Barris, ao norte com o Rio do Sal, a leste com o Rio Sergipe e o Oceano Atlântico e a oeste com os municípios de São Cristóvão e Nossa Senhora do Socorro. Apresenta área territorial igual a 181,857 km², com uma população estimada, no ano de 2018, de 648939 habitantes (ARAÚJO et al., 2010, FRANÇA et al., 2012, IBGE, 2018).

Figura 10 - Localização geográfica de Aracaju.



Fonte: Elaborado pelo programa ArcGis®. Data da elaboração: 18 de out. de 2018.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo As (clima tropical com estação seca de verão e chuvosa de inverno), com temperatura máxima de 30°C e mínima de 23°C. A cidade apresenta um período seco de primavera-verão, que varia de um

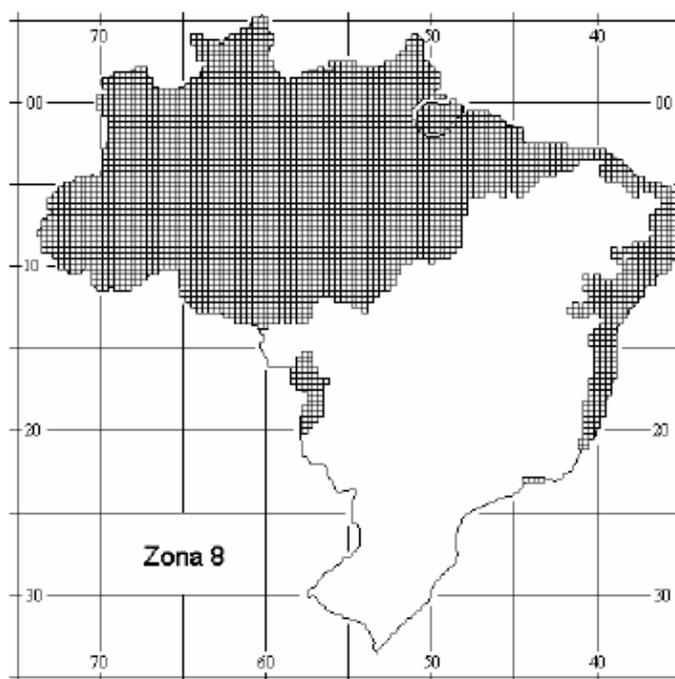
a três meses, no período compreendido entre dezembro e fevereiro, e um período chuvoso de outono-inverno. Além disso, a precipitação média anual normal gira em torno de 1400 mm (ARAÚJO; VILAR, 2004; ARAÚJO et al., 2010; FRANÇA et al., 2012).

Segundo a classificação de Strahler, Aracaju - SE possui clima litorâneo úmido e a massa de ar tropical atlântica é a que exerce maior influência nesse tipo climático. Além disso, as médias térmicas e os índices pluviométricos apresentam valores elevados (COSTA, 2009).

Conceição (2017) realizou a análise dos dados climáticos de Aracaju - SE, referentes ao período de 1961 a 1990. Pela análise, o autor inferiu que os meses de outubro a maio foram os mais quentes, a precipitação anual foi de aproximadamente 1700 mm e os meses de março a agosto foram os mais chuvosos.

Como Aracaju - SE está localizada na Zona Bioclimática 8 (Figura 13), segundo o Zoneamento Bioclimático Brasileiro proposto pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b), as diretrizes construtivas recomendadas para essa região consistem na adoção de aberturas grandes, coberturas leves e refletoras, ventilação cruzada permanente no verão e sombreamento das aberturas. Além disso, a referida NBR afirma que o condicionamento térmico passivo não será suficiente nas horas mais quentes.

Figura 11 - Zona Bioclimática 8.



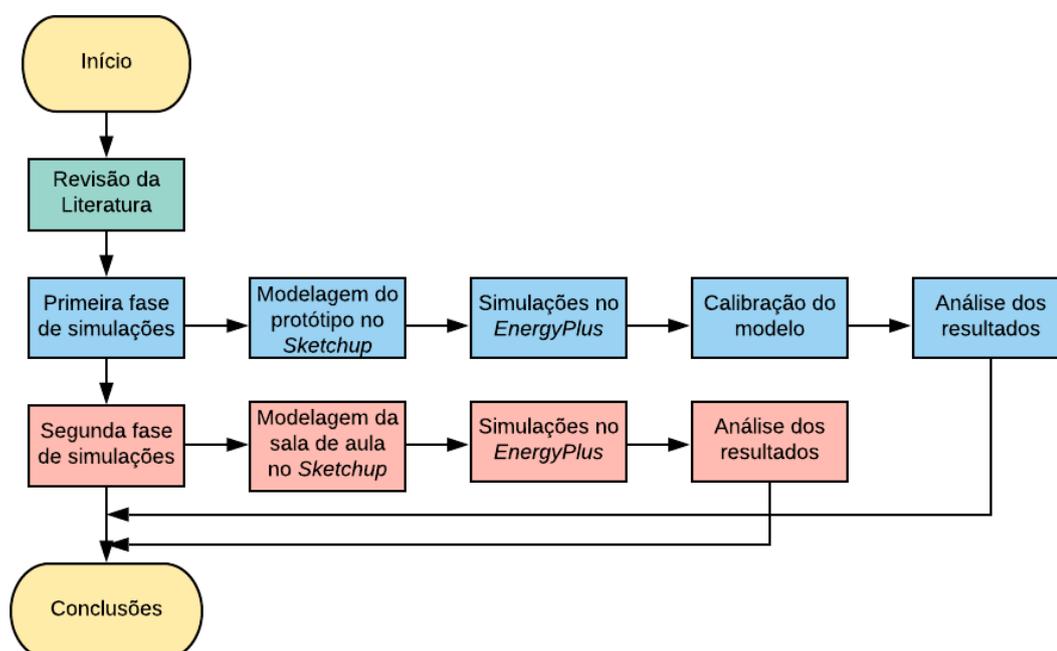
Fonte: NBR 15220-3 (2005b).

4.2 ETAPAS DA PESQUISA

De acordo com a finalidade, a pesquisa classifica-se como aplicada, visto que possui o intuito de gerar conhecimento para ser aplicado na solução de problemas específicos (PRODANOV; FREITAS, 2013). Para se alcançar esse objetivo, foi empregado o método de modelagem e simulação computacional.

Com o intuito de atingir o objetivo do trabalho, foram executadas as etapas apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Etapas do trabalho.



A primeira etapa do trabalho consistiu na Revisão Sistemática da Literatura, com a finalidade de tecer um embasamento teórico concernente ao tema. Os trabalhos pesquisados focaram principalmente na influência dos telhados verdes no ambiente construído. Além disso, foram estudados o *software EnergyPlus*®, versão 8.6 e a NBR 15220-3 (ABNT, 2005b).

A etapa de simulação foi dividida em duas fases: a primeira, que consistiu na simulação do protótipo em escala reduzida, para fins de calibração, e a segunda fase, que consistiu na simulação de uma construção em escala real.

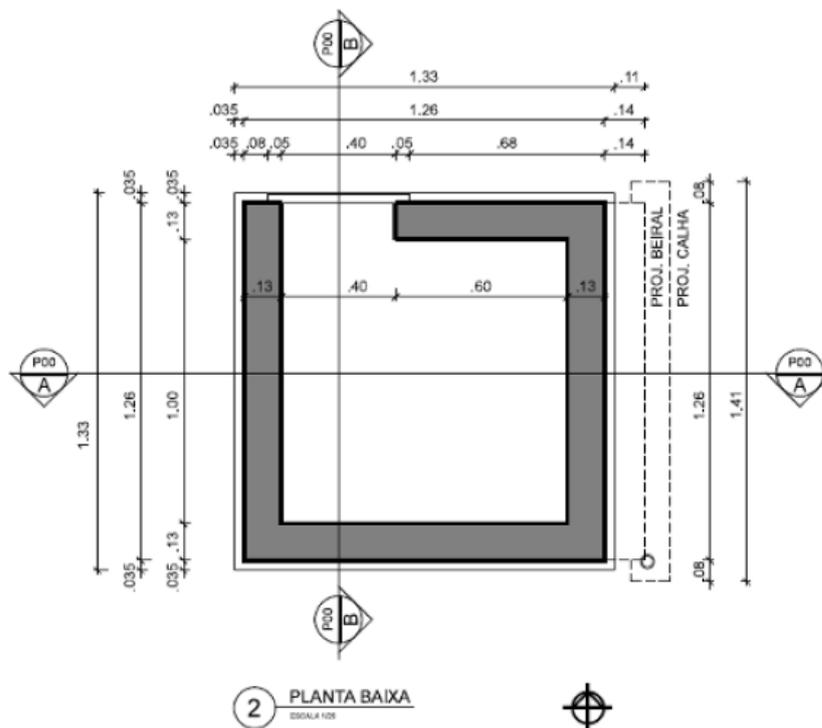
Como a Universidade Federal de Sergipe não possui os equipamentos necessários para as medições, não foi possível realizar medições experimentais. Dessa forma, o presente

trabalho consistiu exclusivamente em modelagem e simulação computacional. Contudo, é importante que existam dados medidos experimentalmente para que os mesmos possam ser comparados com os resultados da simulação e o modelo computacional possa ser calibrado (SILVA, 2014).

Por conta disso, foi realizada uma análise da literatura com a finalidade de se encontrar algum trabalho que realizou medições experimentais em um protótipo com telhado verde, para que os dados medidos pudessem ser utilizados para a calibração do modelo computacional.

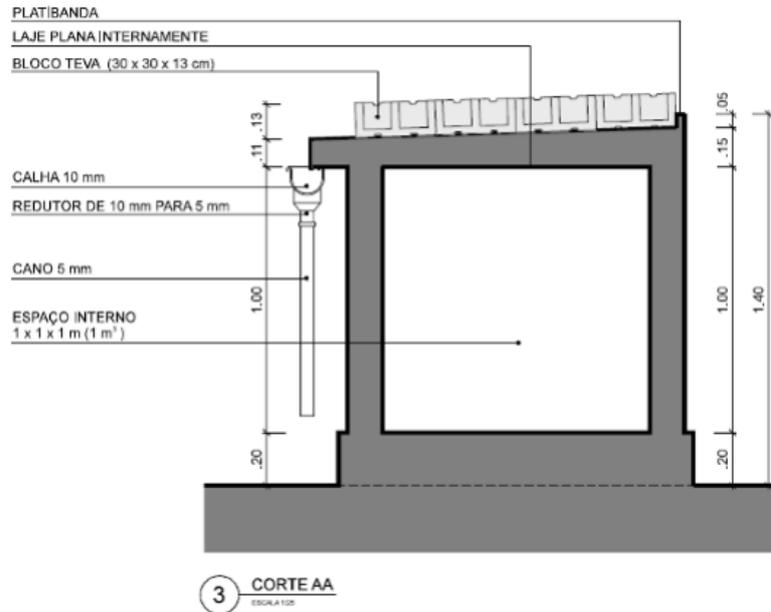
Como não foram encontrados protótipos construídos em Aracaju - SE com essas características, foram analisados protótipos de outras cidades com condições climáticas semelhantes. Dessa forma, escolheu-se o modelo de protótipo utilizado nos trabalhos de Mendonça (2015) e Aranha (2016), que foi construído em João Pessoa - PB (Figuras 13 e 14). Vale ressaltar que tanto Aracaju - SE quanto João Pessoa - PB apresentam clima tropical úmido (CONCEIÇÃO, 2017; ARANHA, 2016) e estão localizadas na Zona Bioclimática 8 (ABNT, 2005b).

Figura 13 - Planta baixa do protótipo.



Fonte: Mendonça (2015).

Figura 14 - Corte do protótipo.

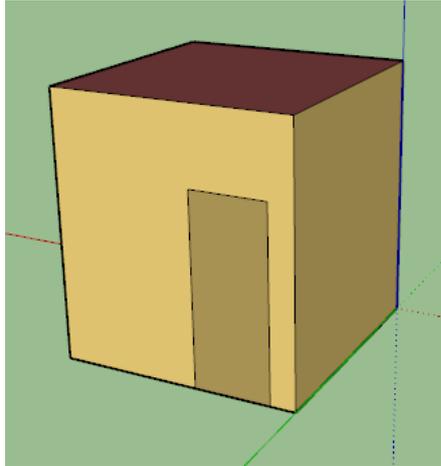


Fonte: Mendonça (2015).

O protótipo escolhido possui pé-direito de 1,40 m e dimensões internas iguais a 1,0 x 1,0 m. A laje da cobertura e o piso são de concreto armado, as paredes são constituídas de blocos cerâmicos de oito furos, revestidos por argamassa e a porta é de madeira, com dimensões iguais a 0,40 x 1,0 m (MENDONÇA, 2015).

Posteriormente, foi criado o modelo computacional do referido protótipo no *software Sketchup*® (Figura 15), seguida pela simulação térmica no *software EnergyPlus*®. Logo após essa etapa, foi realizada a comparação dos dados simulados com os medidos experimentalmente por Mendonça (2015), para fins de calibração. Com o modelo calibrado, foram realizadas outras seis simulações com o protótipo, com alterações de variáveis entre as simulações.

Figura 15 - Modelo do protótipo no Sketchup®.



De acordo com Silva (2014), a calibração consiste em analisar as diferenças entre os dados simulados e os medidos experimentalmente. Segundo Chan e Chow (2013), as Equações 2 e 3 podem ser utilizadas para realizar a comparação entre os valores simulados e os medidos de forma experimental. A Equação 2 corresponde à média das diferenças entre os valores medidos e os simulados e a Equação 3 refere-se ao desvio médio dos valores simulados em relação aos medidos.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{exp,i})}{n} \quad (2)$$

Em que:

MBE : *mean bias error* [°C] (tendência do erro médio);

$X_{sim,i}$: valor simulado [°C];

$X_{exp,i}$: valor medido experimentalmente [°C];

n : quantidade de valores medidos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{exp,i})^2}{n}} \quad (3)$$

Em que:

$RMSE$: *root-mean-square error* [°C] (erro médio absoluto);

$X_{sim,i}$: valor simulado [°C];

$X_{exp,i}$: valor medido experimentalmente [°C];

n : quantidade de valores medidos.

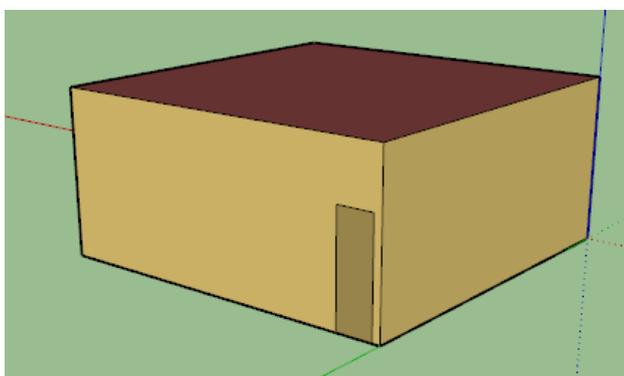
Uma vez que a pesquisa de Mendonça (2015), além de analisar o comportamento térmico de protótipos com telhado verde extensivo, também analisou protótipos com telha cerâmica, decidiu-se realizar a calibração do modelo do protótipo com telhado extensivo e do modelo do protótipo com telha cerâmica.

Como os resultados obtidos nessa fase da pesquisa possuíam como propósito servir apenas para a calibração dos modelos computacionais, foi utilizado o arquivo climático INMET de João Pessoa - PB nessas simulações (LABEEE, 2018), visto que as medições experimentais ocorreram nessa cidade. Para a temperatura do solo, utilizou-se o arquivo climático TRY de Recife - PE, visto que João Pessoa - PB não possui arquivo TRY e o arquivo INMET não apresenta dados de temperatura do solo (LABEEE, 2018). Vale ressaltar que foi utilizado o arquivo climático de Aracaju - SE nas demais simulações, como descrito nos procedimentos metodológicos.

Com o modelo calibrado, foram realizadas outras seis simulações com o protótipo, com alterações de variáveis entre as simulações, a saber: o tipo de cobertura e a condição de fronteira exterior das paredes.

A segunda fase de simulações consistiu na modelagem do estudo de caso (Figura 16). Essa fase teve como intuito analisar a influência do telhado verde em uma construção em escala real, com o objetivo de aproximar o modelo computacional da realidade. O estudo de caso escolhido foi uma sala de aula de uma escola pública de Aracaju - SE. Escolheu-se modelar uma sala de aula, visto que as características físicas do ambiente escolar influenciam sobremaneira o processo de aprendizado e, por conta disso, as preocupações com o desempenho térmico devem ser levadas em consideração (DIAS, 2011).

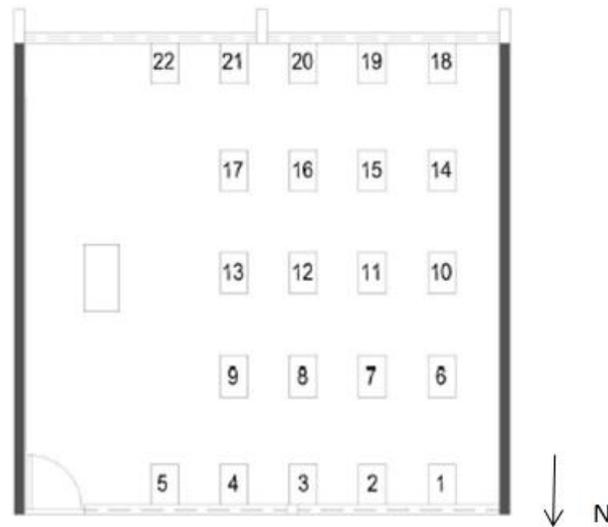
Figura 16 - Modelo da sala de aula no Sketchup®.



De forma geral, grande parte das salas de aula das escolas estaduais de Aracaju - SE apresentam tipologia semelhante: cobertura em telha cerâmica e aberturas com basculantes

em vidro e alumínio ou cobogós (DIAS, 2011). Por conta disso, nesse trabalho modelou-se uma sala de aula com esse tipo de configuração padrão (Figura 17).

Figura 17 - Planta baixa da tipologia padrão de uma sala de aula de escola estadual.



Fonte: Dias (2011).

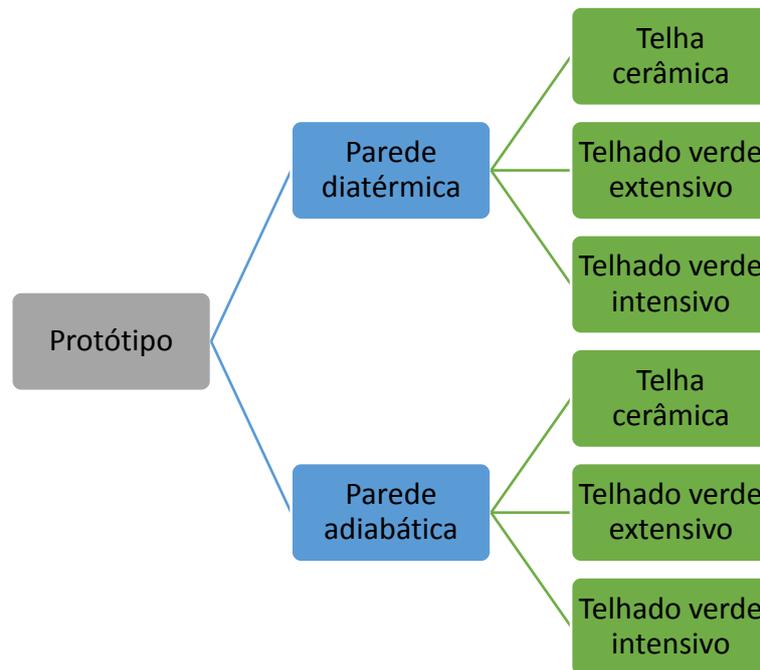
As dimensões consideradas para a sala de aula foram de 6,85 x 6,85 m e pé-direito igual a 3,18 m. Além disso, adotou-se que a sala era ocupada por 23 pessoas, o horário de ocupação era das 7 h às 17 h e a taxa metabólica era igual a 70 W/m² (DIAS, 2011; LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 2014).

De acordo com Cabús (2002), para salas de aula localizadas no hemisfério sul, deve-se evitar que as áreas de janelas estejam orientadas para leste e oeste, pois isso dificulta o controle da insolação solar direta e causa aquecimento excessivo. Por conta disso, adotou-se a orientação indicada na Figura 17, com as aberturas localizadas no eixo norte-sul.

4.3 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SIMULAÇÃO

Na primeira fase de simulações, foram realizadas seis simulações e as seguintes variáveis foram alteradas: o tipo de cobertura (telha cerâmica, telhado verde extensivo e telhado verde intensivo) e a condição de fronteira exterior da parede (parede diatérmica e parede adiabática) (Figura 18).

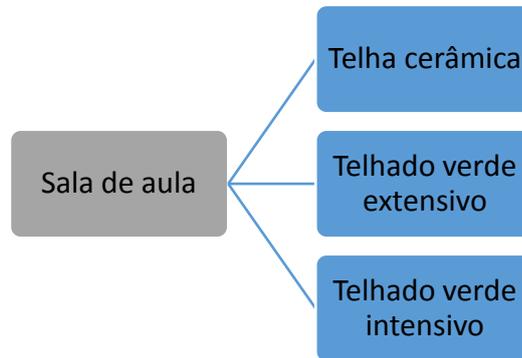
Figura 18 - Simulações realizadas na primeira fase.



É importante salientar que as paredes diatérmicas permitem a passagem do fluxo de calor ao passo que as paredes adiabáticas não estão expostas ao vento nem à radiação solar e não há transferência de calor entre os constituintes do elemento (SILVA, 2014). Optou-se por realizar simulações com paredes adiabáticas com o intuito de se analisar o comportamento térmico da cobertura sem a interferência das paredes do modelo. Vale ressaltar que a porta não foi incluída nas simulações com as paredes adiabáticas, visto que o *EnergyPlus*® não permite o uso de aberturas em elementos adiabáticos.

Já na segunda fase de simulações, foram realizadas três simulações e somente o tipo de cobertura foi alterado em cada simulação (Figura 19). No caso da sala de aula, não foram realizadas simulações com paredes adiabáticas, uma vez que o intuito dessa fase de simulações era analisar a influência do telhado verde em uma situação próxima da realidade e uma parede completamente adiabática é uma condição puramente teórica.

Figura 19 - Simulações realizadas na segunda fase.



Para facilitar as análises dos resultados obtidos, adotou-se a convenção para as simulações realizadas, conforme o Quadro 4:

Quadro 4 - Convenção para as simulações.

Fase da simulação	Tipo de cobertura	Condição de fronteira exterior da parede	Simulação
Primeira	Telha cerâmica	Diatérmica	TCPD
Primeira	Telha cerâmica	Adiabática	TCPA
Primeira	Telhado extensivo	Diatérmica	TEPD
Primeira	Telhado extensivo	Adiabática	TEPA
Primeira	Telhado intensivo	Diatérmica	TIPD
Primeira	Telhado intensivo	Adiabática	TIPA
Segunda	Telha cerâmica	-	SC
Segunda	Telhado extensivo	-	SE
Segunda	Telhado intensivo	-	SI

Além disso, considerou-se que a taxa de renovação do ar deu-se somente por infiltração e foi definida uma taxa constante de 1 renovação/hora nas simulações, como recomendado por Spagnuolo et al. (2018). Logo, a velocidade do ar não exerceu influência no comportamento térmico dos modelos (FERRAZ, 2012). Além disso, adotou-se 0,21 m².K/W de resistência térmica da câmara de ar do telhado cerâmico, segundo as recomendações da NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

Os parâmetros físicos dos materiais utilizados nos modelos simulados estão especificados no Quadro 5 e no Quadro 6. Vale ressaltar que caso os dados físicos não fossem encontrados na literatura consultada, utilizava-se o valor *default* (padrão) fornecido pelo *software*.

Quadro 5 - Dados físicos dos materiais utilizados nos modelos.

Material	Bloco cerâmico	Concreto	Telha cerâmica	Argamassa	Madeira
Rugosidade	Rugoso	Rugoso	Média	Média	Média
Espessura [m]	0,014	0,10-0,20	0,01	0,025	0,03
Condutividade [W/m.K]	0,9	1,75	1,05	1,15	0,15
Densidade [kg/m³]	2252	2400	2000	2000	500
Calor específico [J/kg.K]	920	1000	920	1000	2300
Absortância térmica	0,9	0,9	0,9	0,5	0,9
Absortância solar	0,7	0,375	0,75	0,375	0,7
Absortância visível	0,7	0,7	0,7	0,2	0,7

Fonte: Ordenes et al. (2003), NBR 15220-2 (2005a); Dorneles (2008).

Quadro 6 - Parâmetros físicos do vidro da janela.

Espessura [m]	0,004
Transmitância solar	0,837
Refletância solar frontal	0,075
Refletância solar posterior	0,075
Transmitância visível	0,898
Refletância visível frontal	0,081
Refletância visível posterior	0,081
Transmitância infravermelha	0
Emissividade hemisférica infravermelha frontal	0,84
Emissividade hemisférica infravermelha posterior	0,84
Condutividade	0,9

Fonte: NBR 15220-2 (2005a).

Com relação aos telhados verdes, os dados físicos dos materiais para ambas as tipologias estão especificados nos Quadros 7 e 8. É importante ressaltar que a estrutura do telhado verde consistiu em uma laje de concreto com as mesmas características da laje utilizada na cobertura convencional. Já no Quadro 9, estão elencados os parâmetros específicos para cada tipologia de telhado verde.

Quadro 7 - Dados físicos das camadas utilizados nos telhados verdes.

Material	Camada filtro	Camada drenante	Barreira impermeável
Rugosidade	Liso	Liso	Liso
Espessura [m]	0,005	0,06	0,007
Condutividade [W/m.K]	0,06	0,08	0,17
Densidade [kg/m³]	160	800	1200
Calor específico [J/kg.K]	2500	920	920
Absortância térmica	0,9	0,9	0,9
Absortância solar	0,2	0,2	0,2
Absortância visível	0,2	0,2	0,2

Fonte: Beyer (2008); Silva (2014).

Quadro 8 - Parâmetros gerais da vegetação e do substrato dos telhados verdes.

Refletividade da folha	0,25
Emissividade da folha	0,95
Resistência estomática mínima [s/m]	180
Rugosidade do solo	Rugoso
Condutibilidade do solo seco [w/m.K]	1
Densidade do solo seco [kg/m³]	1500
Calor específico do solo seco [J/kg.K]	1900
Absortância térmica	0,9
Absortância solar	0,8
Absortância visível	0,8
Teor de umidade de saturação	0,3
Teor de umidade residual	0,01
Teor de umidade inicial	0,1
Método de cálculo de difusão da umidade	Simplex

Fonte: Silva (2014).

Quadro 9 - Parâmetros específicos dos telhados verdes.

Extensivo	Altura da vegetação [m]	0,05
	IAF	1
	Espessura do solo [m]	0,10
Intensivo	Altura da vegetação [m]	0,50
	IAF	2,5
	Espessura do solo [m]	0,35

Fonte: Silva (2014).

Os índices de área foliar (IAFs) e as alturas de vegetação utilizados nas simulações correspondem a plantas suculentas do gênero *Sedum* spp. (IAF = 1,0), que são bastante tolerantes à seca, sendo utilizadas em climas quentes, e a espécies de gramíneas de porte mediano (IAF = 2,5) (ASCIONE et al., 2013). É importante salientar que essas espécies vegetais são comumente utilizadas nessas duas tipologias de telhado verde respectivamente (SILVA, 2014).

4.4 TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS PELO *SOFTWARE*

As simulações ocorreram para todos os dias do ano e não somente para os dias típicos. Para as temperaturas externas, foi utilizado o arquivo climático INMET 2018 de Aracaju - SE e para as temperaturas do solo, utilizou-se o arquivo climático TRY de Maceió - AL, visto que Aracaju - SE não possui arquivo TRY e o arquivo INMET não apresenta dados de temperatura do solo (LABEEE, 2018).

Os seguintes dados de saída foram fornecidos pelo *EnergyPlus*®: temperatura interna do ambiente, temperatura superficial interna da cobertura e temperatura superficial externa do solo (no caso dos telhados verdes), tanto para o modelo do protótipo quanto para o modelo da sala de aula.

Para a análise do comportamento térmico das coberturas, foram escolhidas duas semanas do ano: uma semana representativa da estação seca e outra da estação chuvosa, como adotado no trabalho de Silva (2014) e Aranha (2016).

Segundo Costa (2009), o mês de maio é o mais chuvoso e o mês de dezembro é o mais seco em Aracaju - SE, por conta disso foram escolhidas semanas desses meses para as análises. No caso da estação chuvosa, foi escolhido o período compreendido entre 22 e 28 de maio (semana mais quente do mês e com temperaturas estáveis) e para a estação seca, escolheu-se a semana compreendida entre 25 e 31 de dezembro (semana mais quente do mês e com temperaturas estáveis).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

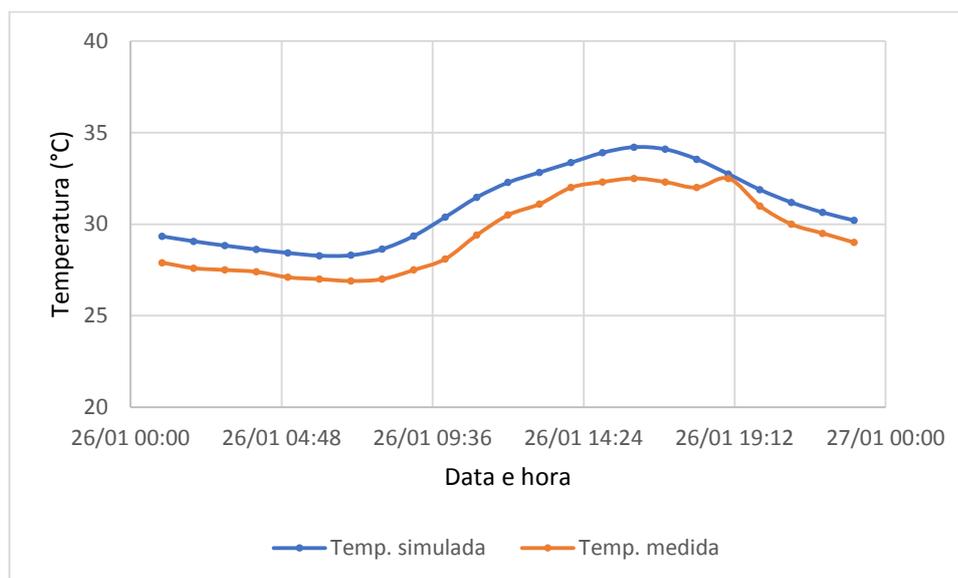
5.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para comparar os dados medidos com os simulados, foram aplicadas as Equações 2 e 3 apresentadas na seção 4.2, cujos resultados estão exibidos no Quadro 10 (telhado extensivo) e no Quadro 11 (telha cerâmica). Já os Gráficos 1 a 4 representam a evolução das temperaturas internas e das temperaturas superficiais internas, tanto as simuladas quanto as medidas por Mendonça (2015), para os dois tipos de cobertura.

Quadro 10 - MBE e RMSE dos valores medidos e simulados para o telhado extensivo.

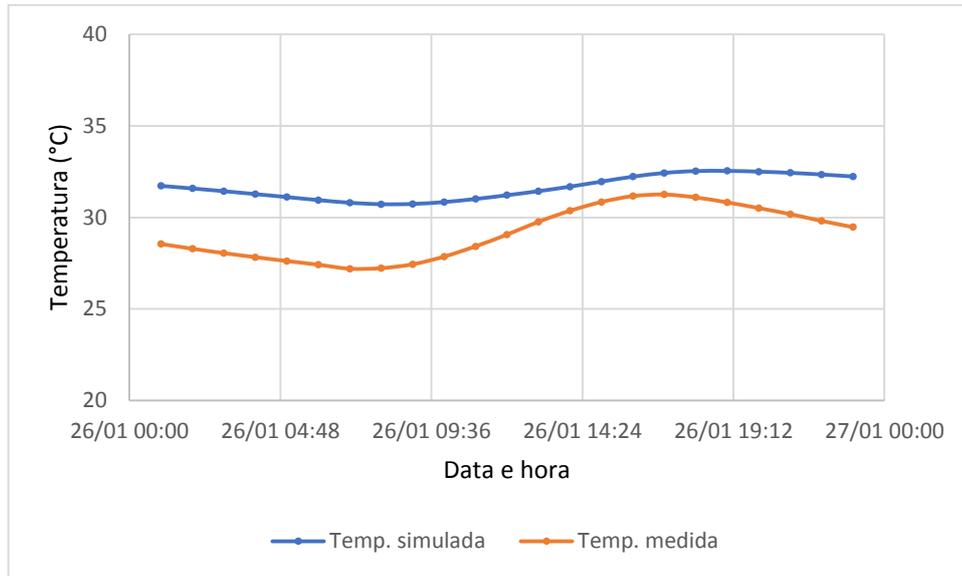
Parâmetro analisado	MBE (°C)	RMSE (°C)
Temperatura superficial interna do telhado	2,52	2,66
Temperatura interna	1,45	1,50

Gráfico 1 - Evolução das temperaturas internas do protótipo com telhado extensivo.



Legenda: Temp. simulada: temperatura simulada. Temp. medida: temperatura medida.

Gráfico 2 - Evolução das temperaturas superficiais internas do telhado extensivo.

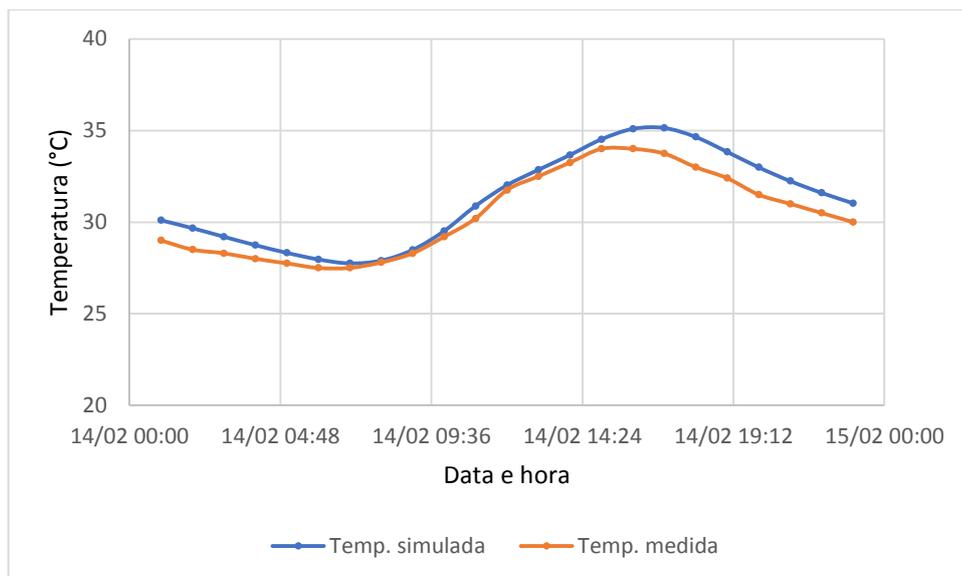


Legenda: Temp. simulada: temperatura simulada. Temp. medida: temperatura medida.

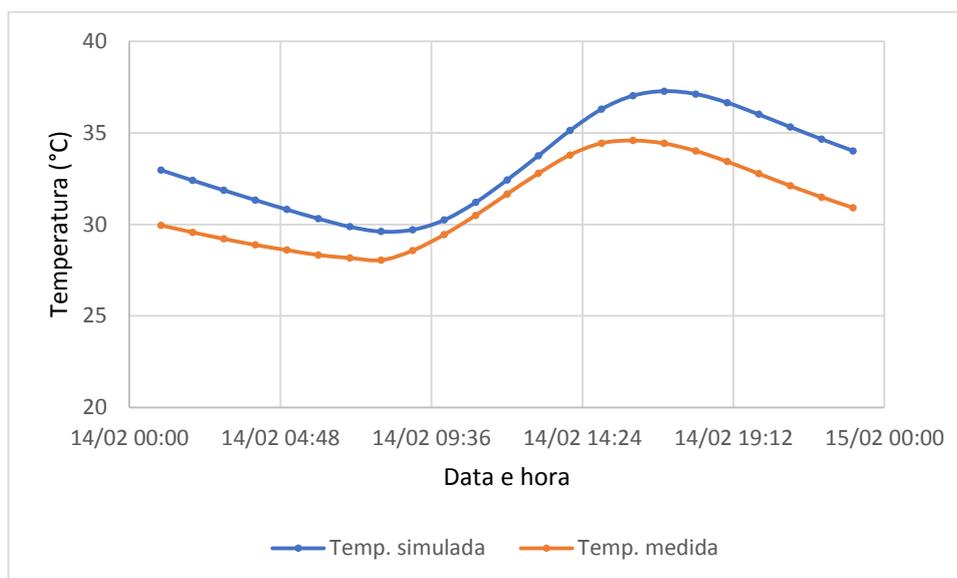
Quadro 11 - MBE e RMSE dos valores medidos e simulados para a telha cerâmica.

Parâmetro analisado	MBE (°C)	RMSE (°C)
Temperatura superficial interna do telhado	2,23	2,40
Temperatura interna	0,77	0,91

Gráfico 3 - Evolução das temperaturas internas do protótipo com telha cerâmica.



Legenda: Temp. simulada: temperatura simulada. Temp. medida: temperatura medida.

Gráfico 4 - Evolução das temperaturas superficiais internas da telha cerâmica.

Legenda: Temp. simulada: temperatura simulada. Temp. medida: temperatura medida.

No caso da telha cerâmica, a diferença média entre as temperaturas internas medidas e as simuladas foi de 2,61% e a diferença média entre as temperaturas superficiais internas medidas e as simuladas foi de 7,16%. Já para o telhado extensivo, a diferença média entre as temperaturas internas medidas e as simuladas foi de 4,96% e a diferença média entre as temperaturas superficiais internas medidas e as simuladas foi de 8,78%.

De forma geral, as evoluções das temperaturas simuladas e das medidas, para ambas as coberturas, foram semelhantes (Gráficos 1 a 4). É importante salientar que as diferenças entre as temperaturas internas medidas e as simuladas (Gráficos 1 e 3) foram inferiores às diferenças entre as temperaturas superficiais internas medidas e as simuladas (Gráficos 2 e 4). No trabalho de Silva (2014), fato semelhante também ocorreu.

Vale ressaltar que as diferenças entre os valores medidos e os simulados, para o caso do protótipo com telhado extensivo, foram superiores às diferenças obtidas para o caso do protótipo com telha cerâmica. Esse fato pode ser explicado por várias razões: o modelo para coberturas verdes utilizado no *EnergyPlus*® apresenta limitações (SILVA, 2014; DIAS, 2016) e o trabalho de Mendonça (2015) não forneceu dados importantes para a simulação, como o IAF da vegetação, a emissividade da folha e a resistência estomática. Em virtude disso, foram utilizados os dados de Silva (2014) e Beyer (2008), o que pode ter gerado imprecisão nos resultados obtidos.

As diferenças entre os valores simulados e os medidos ocorrem por uma série de fatores: as temperaturas do arquivo climático e as propriedades físicas dos materiais que foram utilizadas na simulação podem não representar a realidade, erros de medição por seres humanos podem ocorrer, entre outros (SILVA, 2014).

Considera-se que de forma geral, o modelo computacional simulou corretamente o protótipo real, visto que as diferenças entre os valores medidos e os simulados foram inferiores a 10%, como recomendado por Chan e Chow (2013).

5.2 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

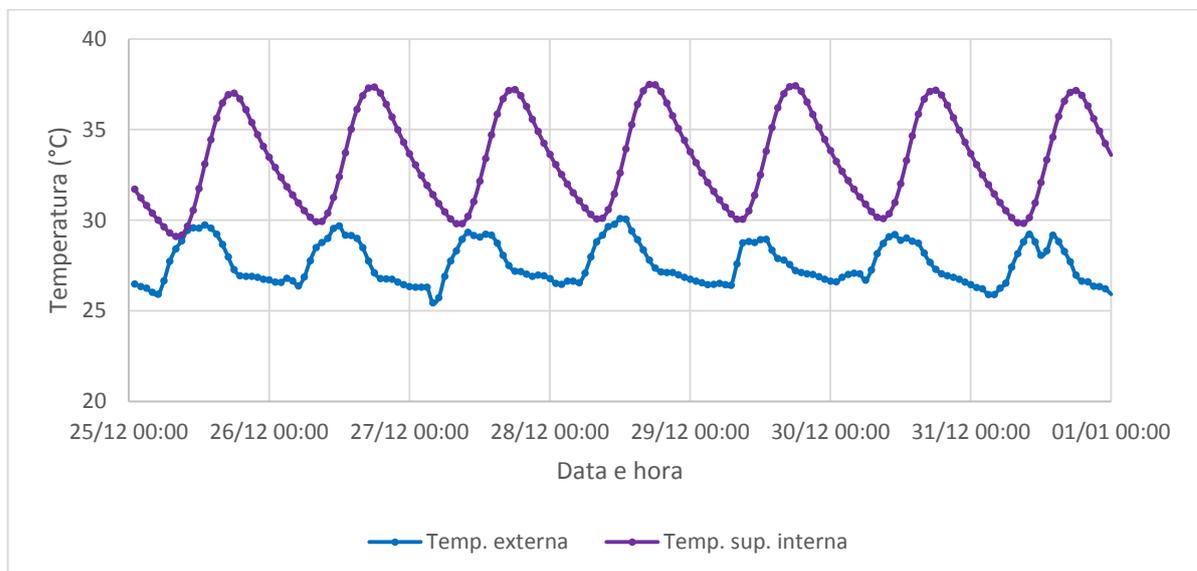
5.2.1 Simulação TCPD

Como definido anteriormente, essa simulação ocorreu no protótipo com telha cerâmica e com parede diatérmica. Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação seca, estão representados no Quadro 12 e nos Gráficos 5 e 6.

Quadro 12 - Dados de temperatura da telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação seca.

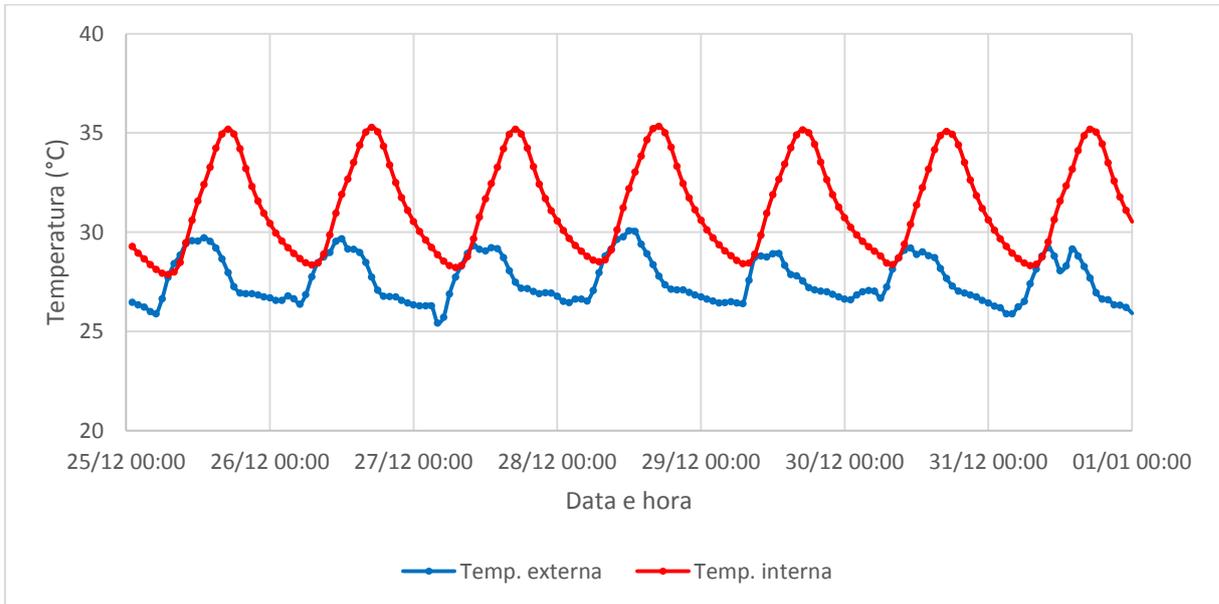
	Temperatura superficial interna	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	8,39	7,46
Temperatura média [°C]	33,35	31,32
Temperatura máxima [°C]	37,48	35,33

Gráfico 5 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 6 - Temperatura interna do protótipo com telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

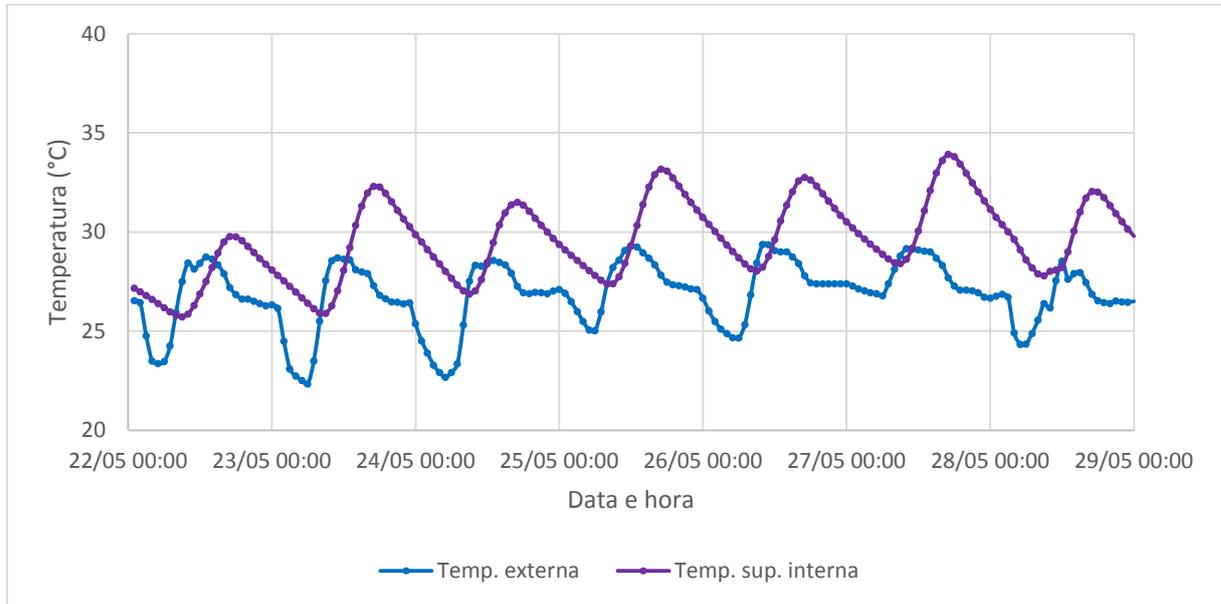
Na estação seca, o atraso térmico foi de aproximadamente 5,43 h e as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 8 h às 9 h do dia 25/12; às 8 h do dia 26/12; às 9 h do dia 27/12; das 8 h às 9 h do dia 28/12 e às 9 h do dia 31/12. Nesses horários, ocorreram picos de radiação solar, como pode ser visto no Apêndice A, o que propiciou um aumento abrupto e intenso da temperatura externa. Por conta do atraso térmico, a temperatura interna permaneceu inferior à externa durante as primeiras horas após a ocorrência desses picos de radiação solar.

Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, para a estação chuvosa, estão representados no Quadro 13 e nos Gráficos 7 e 8.

Quadro 13 - Dados de temperatura da telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação chuvosa.

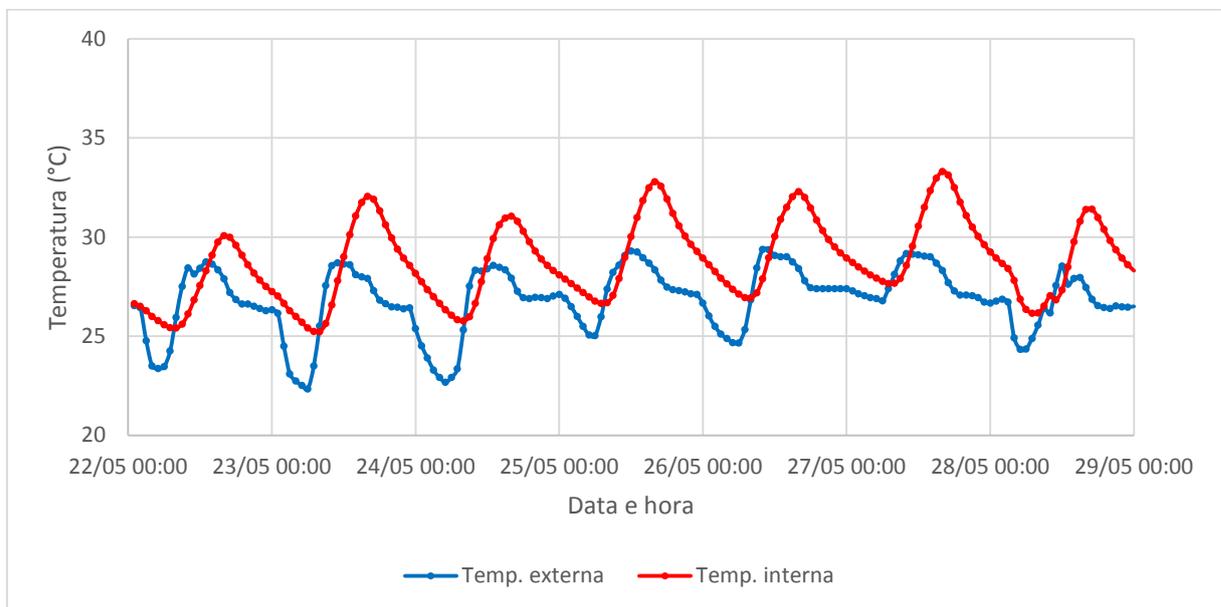
	Temperatura superficial interna	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	8,20	8,07
Temperatura média [°C]	29,58	28,74
Temperatura máxima [°C]	33,91	33,30

Gráfico 7 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 8 - Temperatura interna do protótipo com telha cerâmica, com parede diatérmica (TCPD) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação chuvosa, o atraso térmico foi de 4,57 horas e as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 8 h às 13 h no dia 22/05; das 8 h às 11 h do dia 23/05; das 9 h às 11 h do dia 24/05; das 8 h às 11 h do dia 25/05; das 9 h às

11 h do dia 26/05; das 8 h às 10 h do dia 27/05 e das 11 h às 12 h do dia 28/05. É importante ressaltar que nesses horários ocorreram picos de radiação solar, como pode ser visualizado no Apêndice A, o que elevou a temperatura externa de forma intensa e abrupta. Em virtude do atraso térmico, a temperatura interna manteve-se inferior à externa durante as primeiras horas após a ocorrência desses picos de radiação solar, como ocorreu no caso anterior.

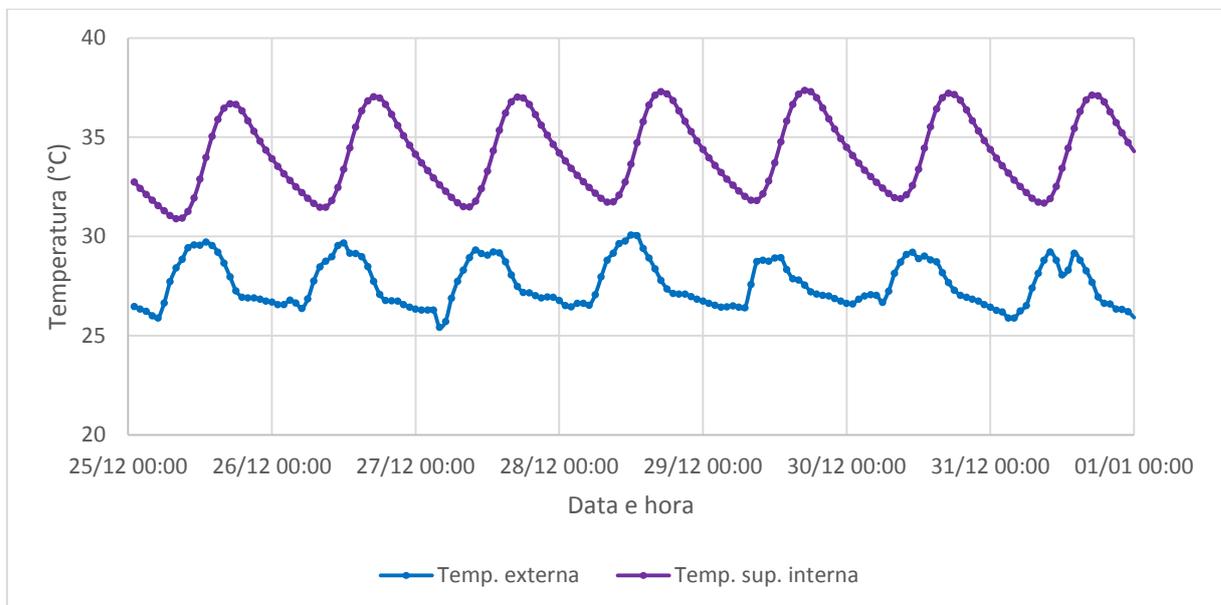
5.2.2 Simulação TCPA

Como já definido, essa simulação ocorreu no protótipo com telha cerâmica e com parede adiabática. Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, para a estação seca, estão representados no Quadro 14 e nos Gráficos 9 e 10.

Quadro 14 - Dados de temperatura da telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação seca.

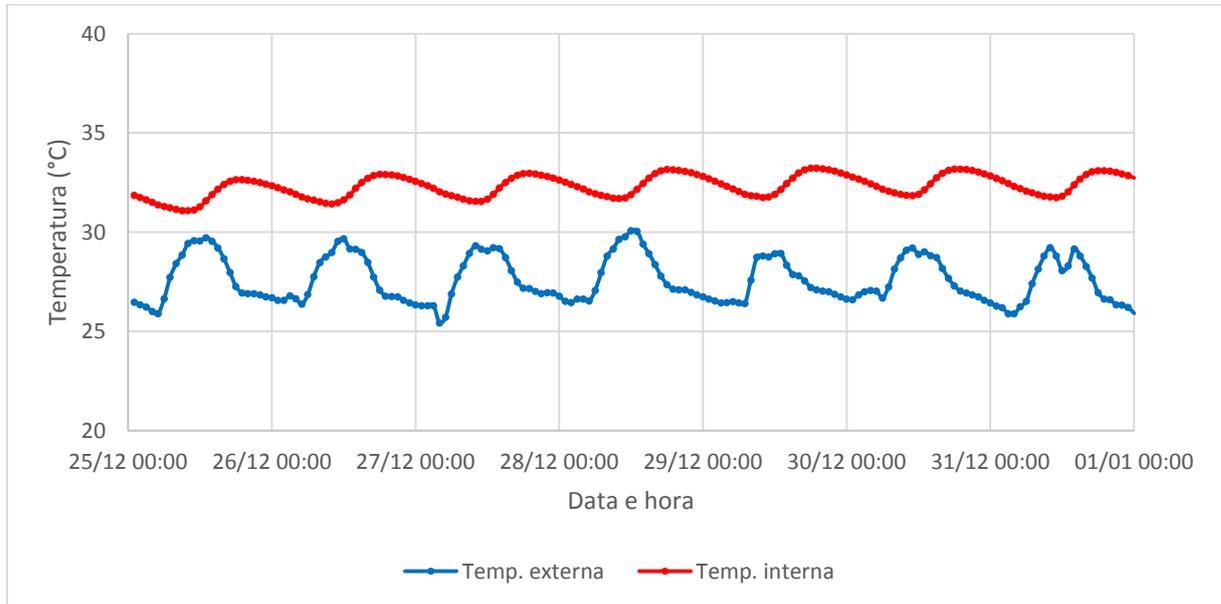
	Temperatura superficial interna	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	6,47	2,15
Temperatura média [°C]	34,16	32,33
Temperatura máxima [°C]	37,37	33,23

Gráfico 9 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 10 - Temperatura interna do protótipo com telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

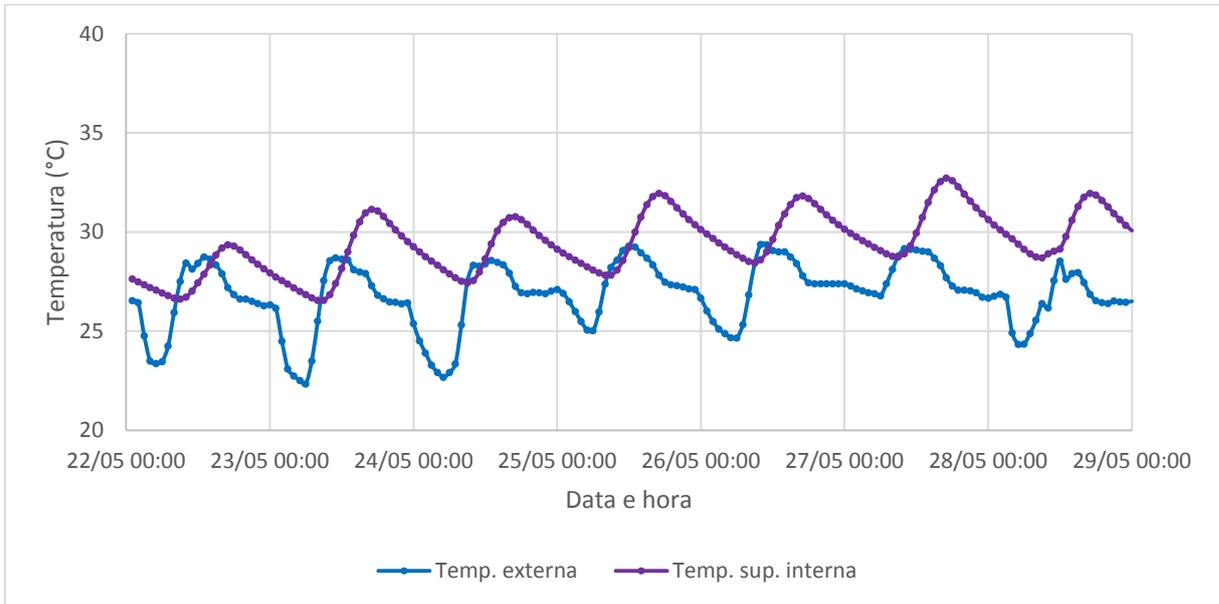
Na estação seca, o atraso térmico foi de aproximadamente 6,86 h e em nenhum horário dentre os dias analisados, a temperatura interna foi inferior à externa.

Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação chuvosa, estão representados no Quadro 15 e nos Gráficos 11 e 12.

Quadro 15 - Dados de temperatura da telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação chuvosa.

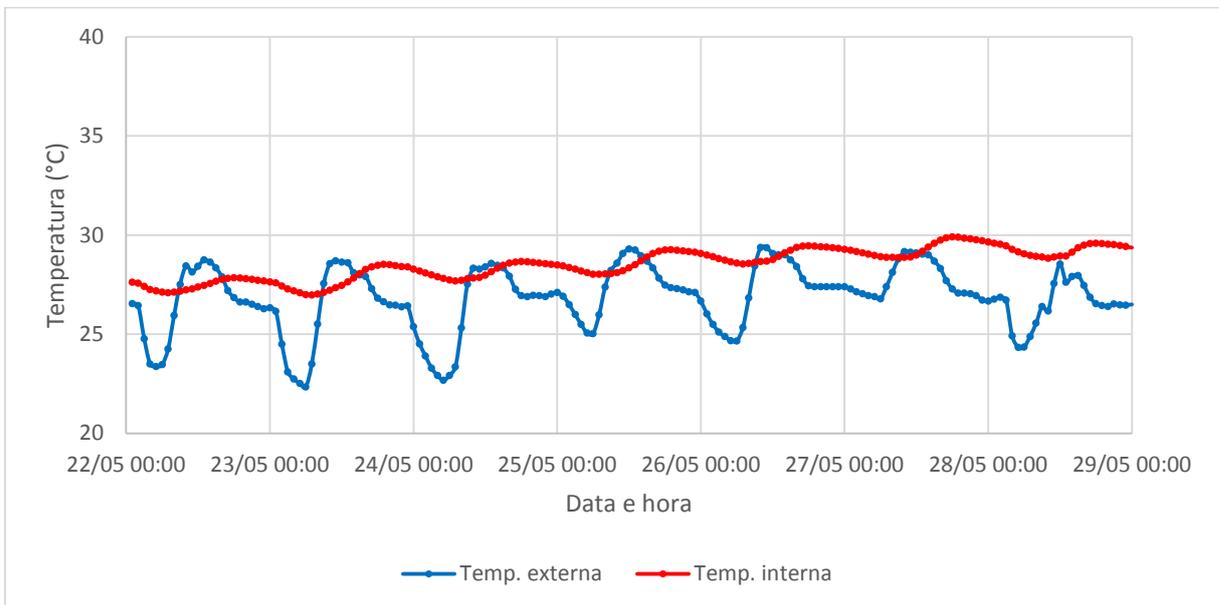
	Temperatura superficial interna	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	6,17	2,93
Temperatura média [°C]	29,44	28,52
Temperatura máxima [°C]	32,72	29,90

Gráfico 11 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 12 - Temperatura interna do protótipo com telha cerâmica, com parede adiabática (TCPA) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação chuvosa, o atraso térmico foi de 4,14 h e as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 9 h às 16 h do dia 22/05; das 9 h às 14 h do dia 23/05; das 10 h às 14 h do dia 24/05; das 9 h às 14 h do dia 25/05; das 10 h às 13 h

do dia 26/05 e das 10 h às 12 h do dia 27/05. Nesses horários, ocorreram picos de radiação solar, como pode ser conferido no Apêndice A, o que propiciou uma elevação abrupta da temperatura externa. Por conta do atraso térmico, a temperatura interna permaneceu inferior à externa durante as primeiras horas após a ocorrência desses picos de radiação solar, da mesma forma que ocorreu nos casos anteriores.

5.2.3 Simulação TEPD

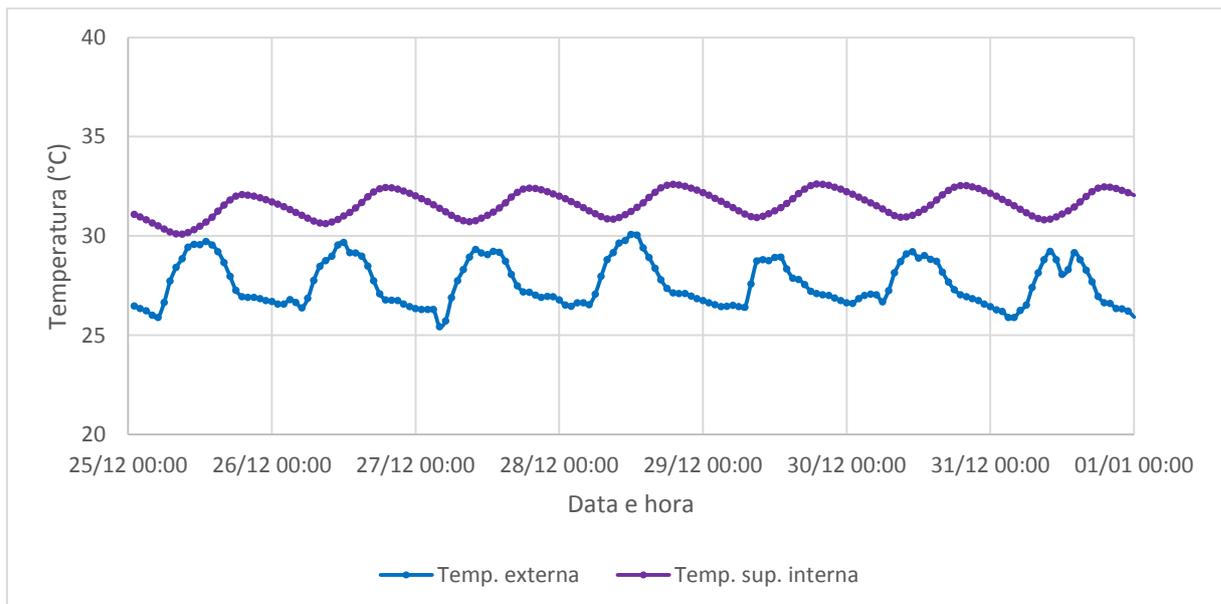
Conforme explicado anteriormente, essa simulação ocorreu no protótipo com telhado extensivo e com parede diatérmica. Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação seca, estão representados no Quadro 16 e nos Gráficos 13 a 15.

Quadro 16 - Dados de temperatura do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação seca.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	2,52	20,80	6,11
Temperatura média [°C]	31,60	37,86	30,70
Temperatura máxima [°C]	32,61	50,32	34,02

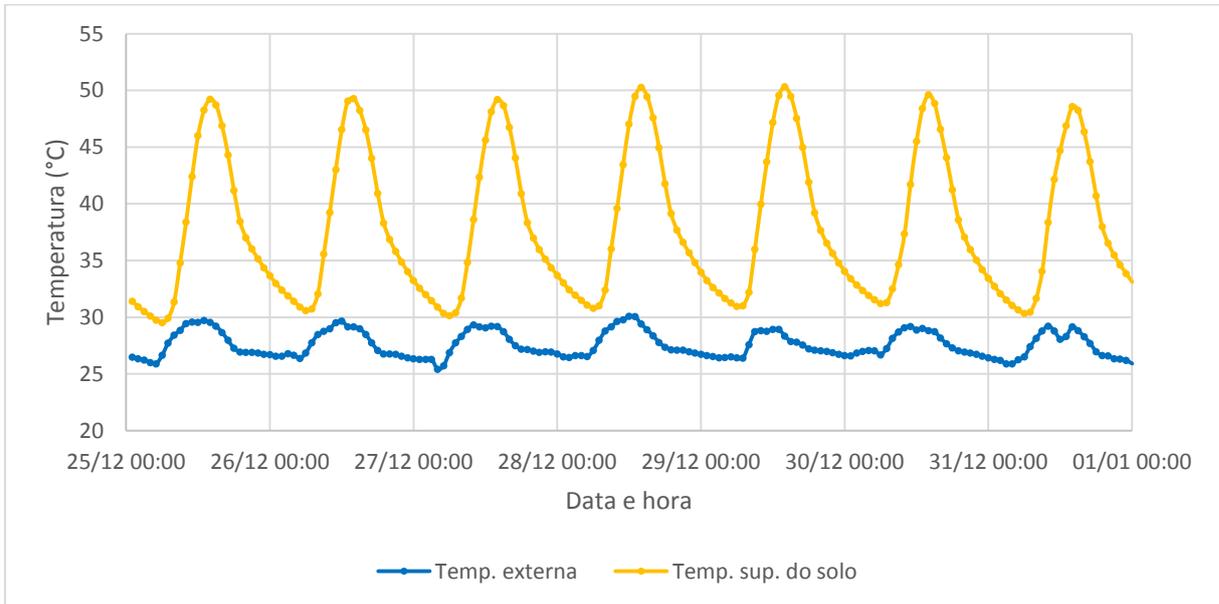
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 13 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação seca.



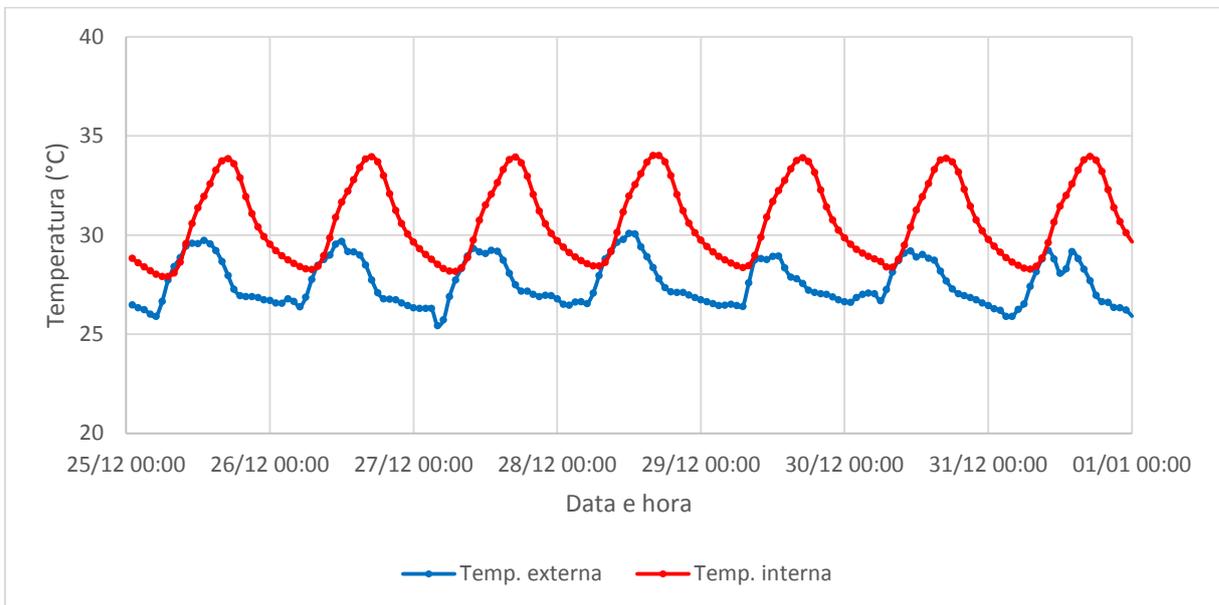
Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 14 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 15 - Temperatura interna do protótipo com telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação seca, o atraso térmico foi de aproximadamente 5,43 h e as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 8 h às 9 h do dia 25/12; às 8 h do dia 26/12; às 9 h do dia 27/12 e às 8 h do dia 28/12. Vale ressaltar que nesses

horários, ocorreram picos de radiação solar, como pode ser conferido no Apêndice A, propiciando um aumento abrupto da temperatura externa. Por conta do atraso térmico, a temperatura interna permaneceu inferior à externa durante as primeiras horas após a ocorrência desses picos de radiação solar, da mesma forma que aconteceu nos casos anteriores.

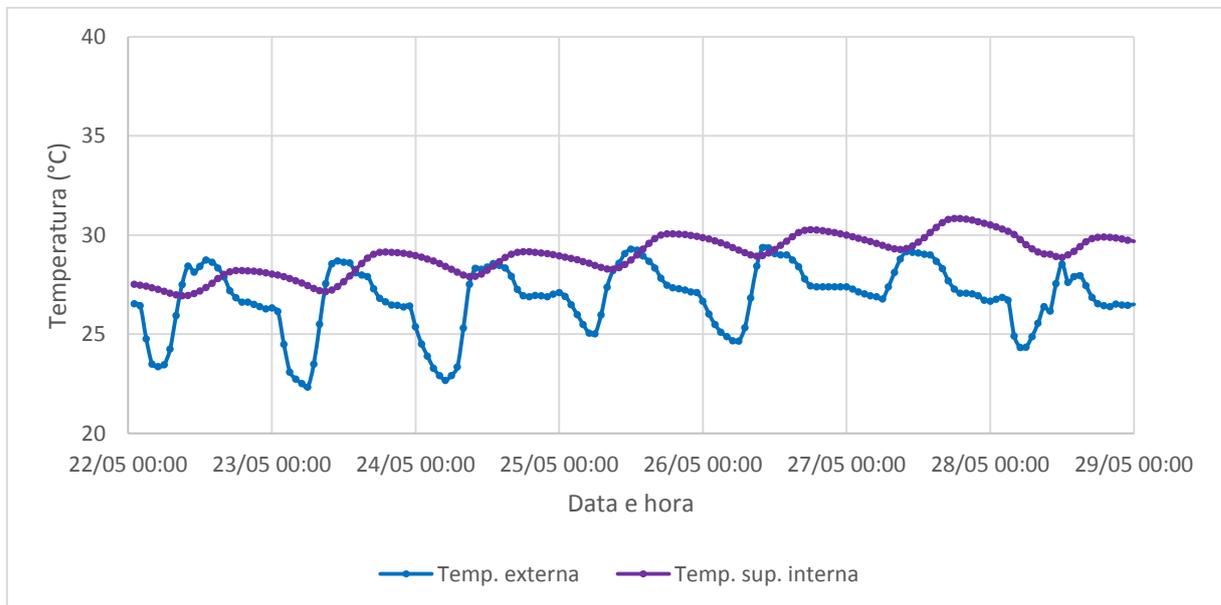
Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, para a estação seca, estão representados no Quadro 17 e nos Gráficos 16 a 18.

Quadro 17 - Dados de temperatura do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação chuvosa.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	3,91	16,65	7,07
Temperatura média [°C]	29,00	32,90	28,53
Temperatura máxima [°C]	30,85	42,94	32,53

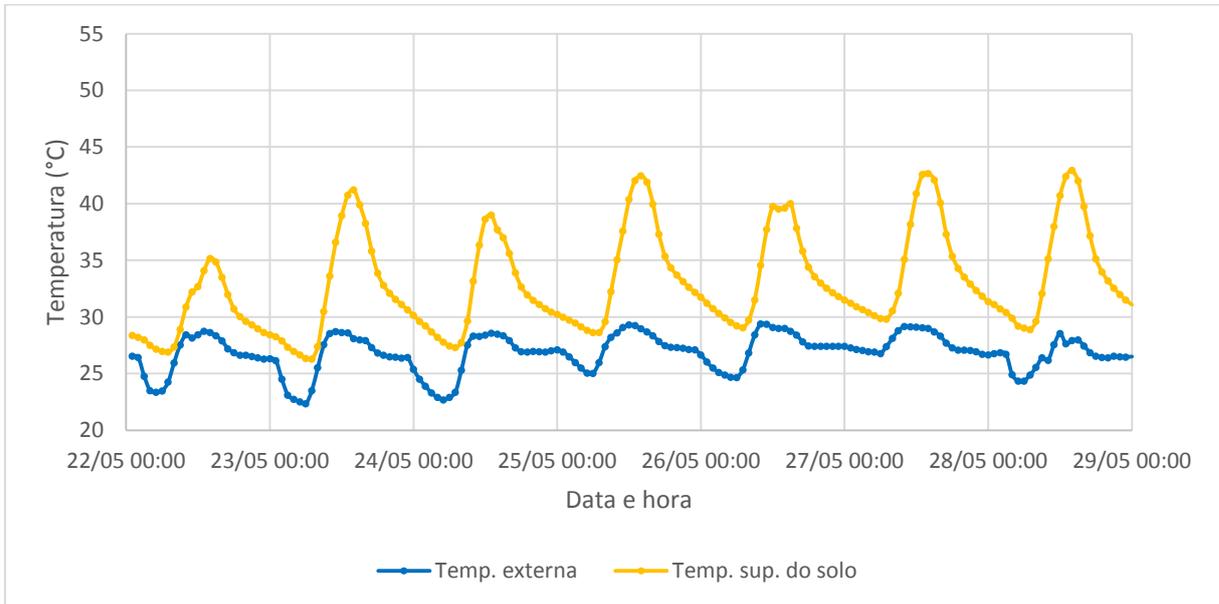
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 16 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação chuvosa.



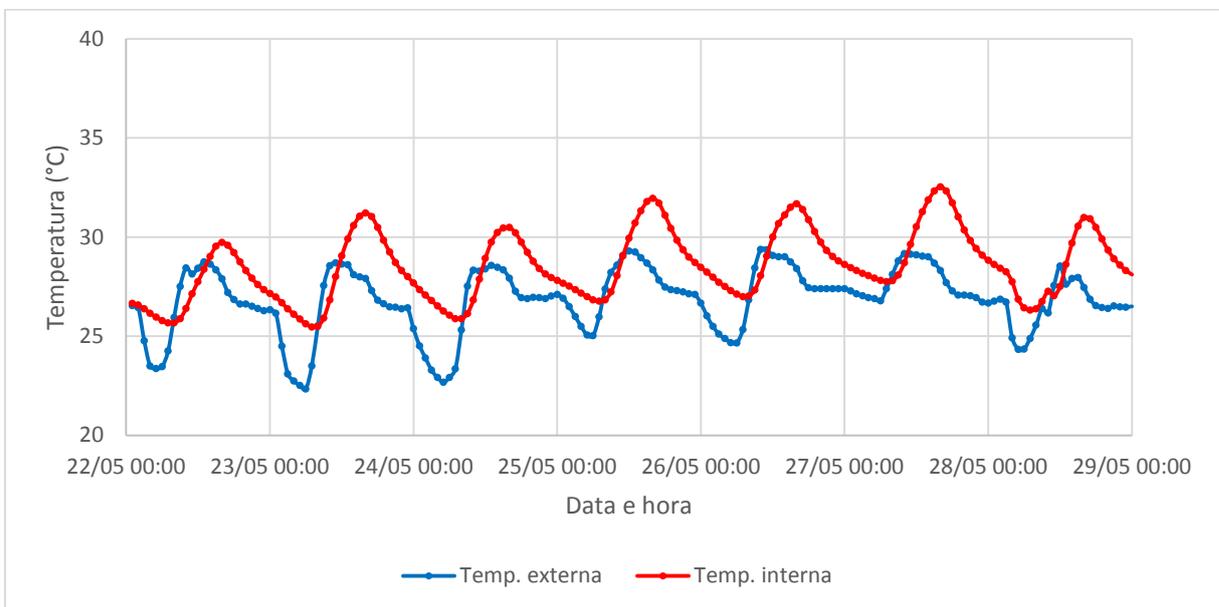
Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 17 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 18 - Temperatura interna do protótipo com telhado extensivo, com parede diatérmica (TEPD) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Já na estação chuvosa, o atraso térmico foi de aproximadamente 4,43 h e as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 8 h às 13 h do dia 22/05; das 8 h às 11 h do dia 23/05; das 9 h às 11 h do dia 24/05; das 8 h às 11 h do

dia 25/05; das 9 h às 11 h do dia 26/05; das 8 h às 10 h do dia 27/05 e das 11 às 12 h do dia 28/05. Nos horários citados, ocorreram picos de radiação solar, como pode ser conferido no Apêndice A, ocasionando um aumento da temperatura externa. Em função do atraso térmico, a temperatura interna continuou inferior à externa durante as primeiras horas após a ocorrência desses picos de radiação solar, como já explicado anteriormente.

5.2.4 Simulação TEPA

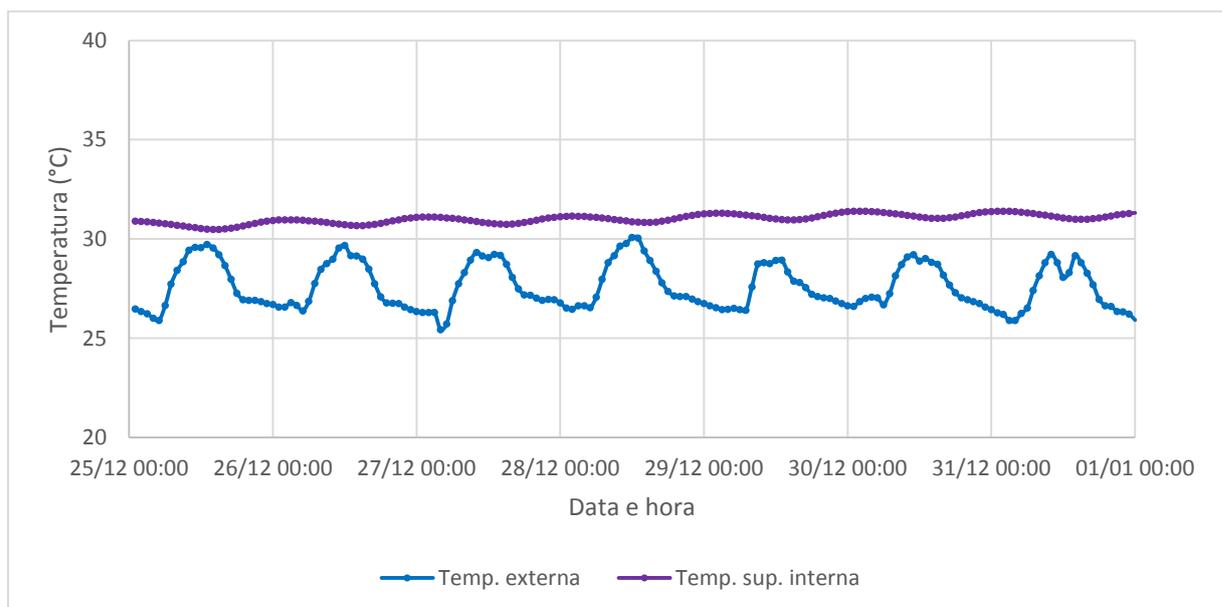
Como explicado anteriormente, essa simulação ocorreu no protótipo com telhado extensivo e com parede adiabática. Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação seca, estão representados no Quadro 18 e nos Gráficos 19 a 21.

Quadro 18 - Dados de temperatura do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação seca.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	0,92	20,77	0,56
Temperatura média [°C]	31,02	37,82	29,91
Temperatura máxima [°C]	31,40	50,27	30,19

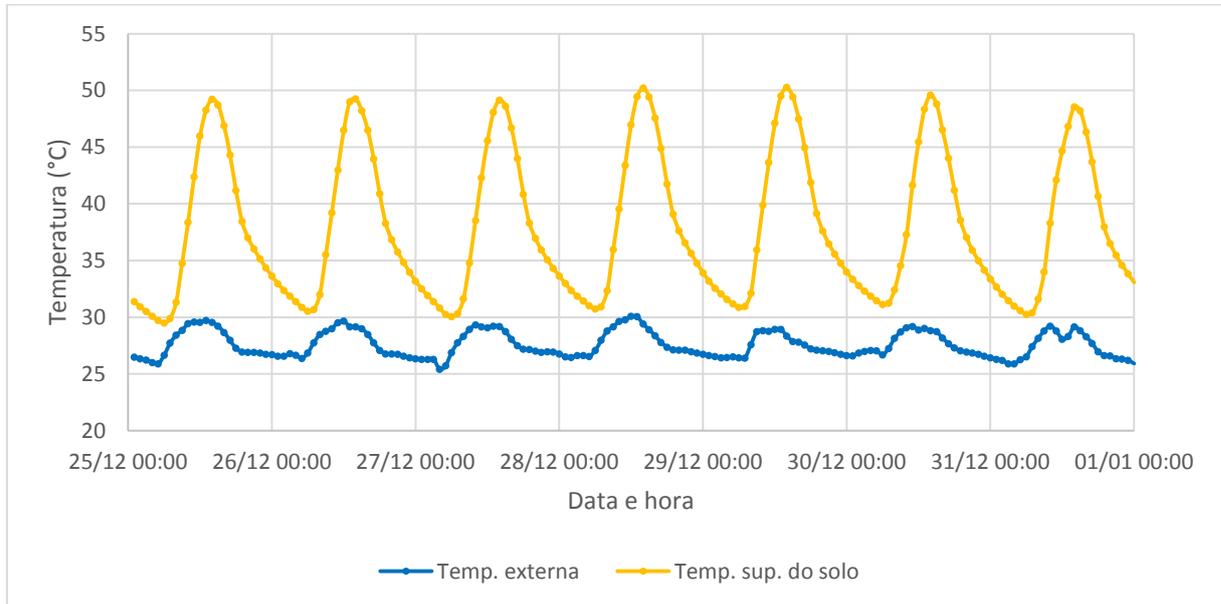
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 19 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação seca.



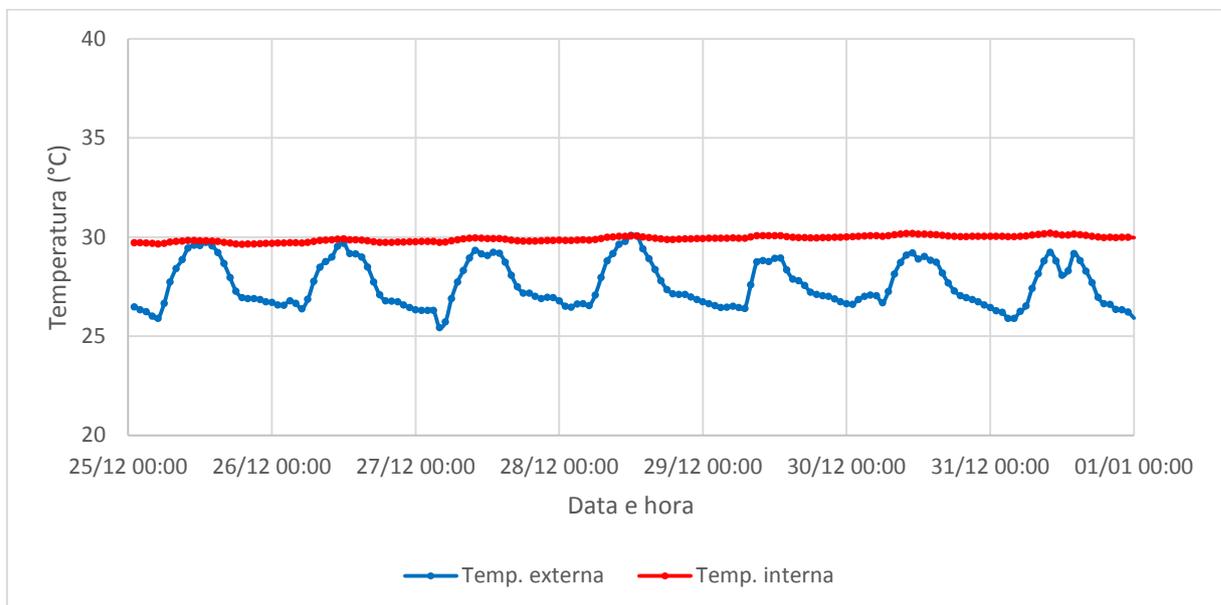
Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 20 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 21 - Temperatura interna do protótipo com telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Como se pode observar pelos Gráficos 19 e 21, a temperatura interna e a temperatura superficial interna sofreram pouca variação ao longo da semana, visto que a inércia térmica do telhado verde auxiliou a estabilizar as temperaturas (KASERA, NAYYAR, SHARMA, 2012).

É importante ressaltar que resultados semelhantes foram obtidos nos trabalhos de Silva (2014) e Dias (2016).

Na estação seca, praticamente não houve atraso térmico, visto que os horários em que ocorreram as temperaturas máximas externas e as máximas internas coincidiram. Além disso, as temperaturas internas foram inferiores às externas das 12 h às 13 h do dia 28/12. É importante destacar que no período citado, houve um pico de radiação solar, como pode ser conferido no Apêndice A, propiciando a elevação das temperaturas externas, que chegaram a ser as mais altas da semana analisada (25 a 28/12).

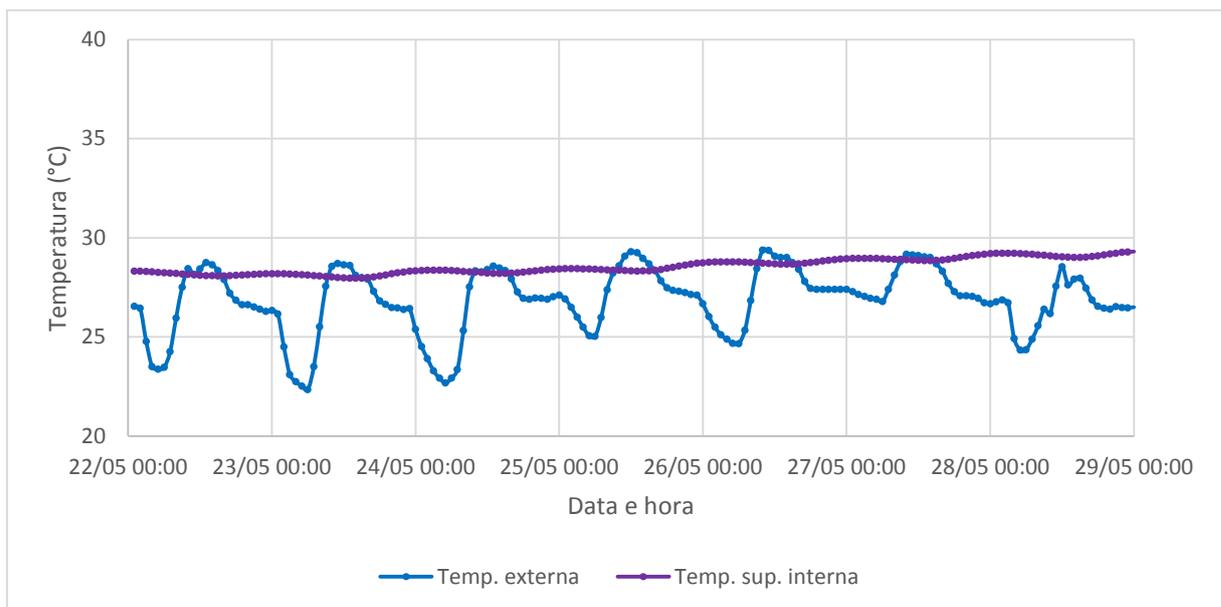
Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação chuvosa, estão representados no Quadro 19 e nos Gráficos 22 a 24.

Quadro 19 - Dados de temperatura do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação chuvosa.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	1,35	16,55	1,14
Temperatura média [°C]	28,55	32,87	27,93
Temperatura máxima [°C]	29,30	42,86	28,45

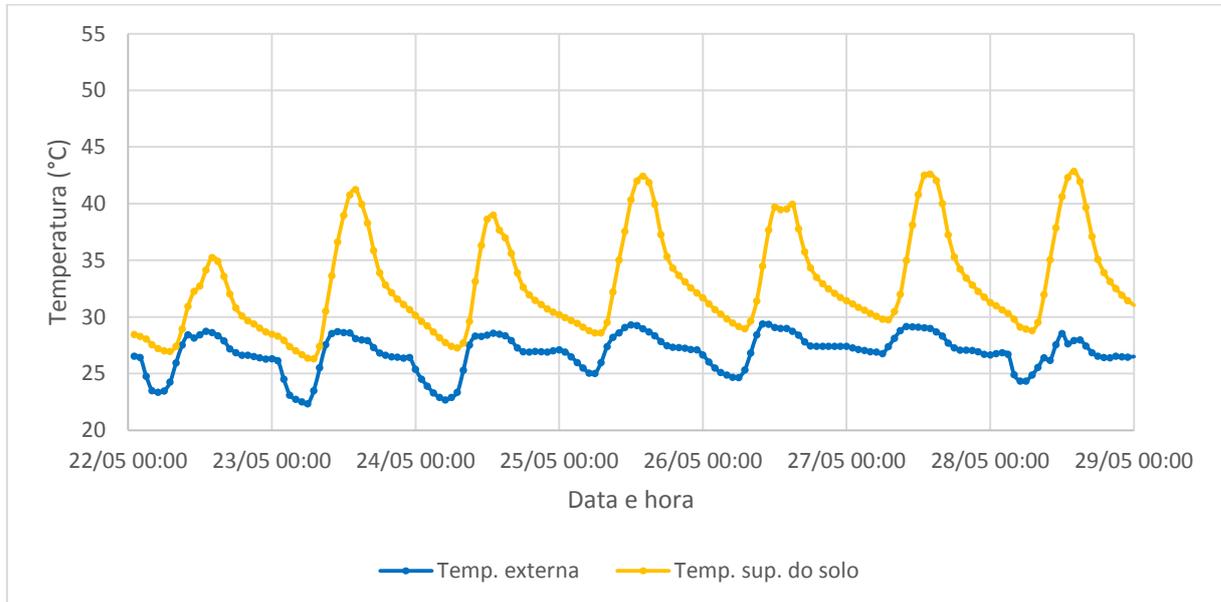
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 22 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação chuvosa.



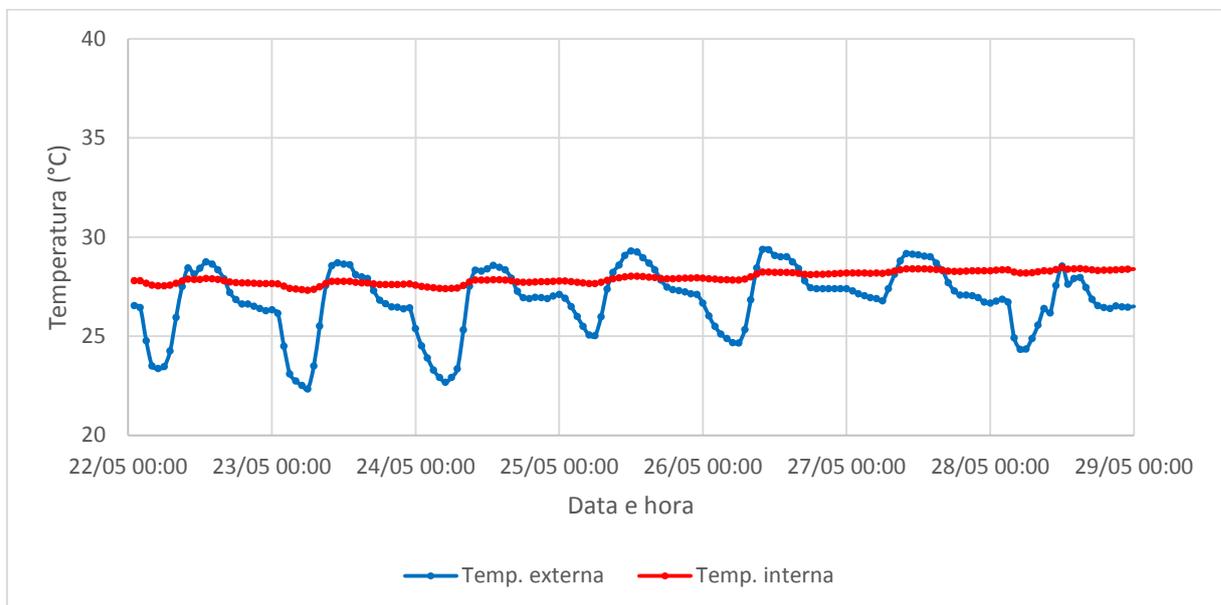
Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 23 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 24 - Temperatura interna do protótipo com telhado extensivo, com parede adiabática (TEPA) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Como se pode observar pelos Gráficos 22 e 24, a temperatura interna e a temperatura superficial interna sofreram pouca variação ao longo da semana, de forma semelhante ao que

ocorreu para a estação seca. Além disso, os resultados também foram condizentes com os obtidos nos trabalhos de Silva (2014) e Dias (2016).

Na estação chuvosa, as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 10 h às 16 h do dia 22/05; das 10 h às 16 h do dia 23/05; das 10 h às 16 h do dia 24/05; das 9 h às 16 h do dia 25/05; das 9 h às 16 h do dia 26/05; das 9 h às 15 h do dia 27/05 e às 12 h do dia 28/05. É importante ressaltar que praticamente não houve atraso térmico, visto que os horários em que ocorreram as temperaturas máximas externas e as internas coincidiram.

5.2.5 Simulação TIPD

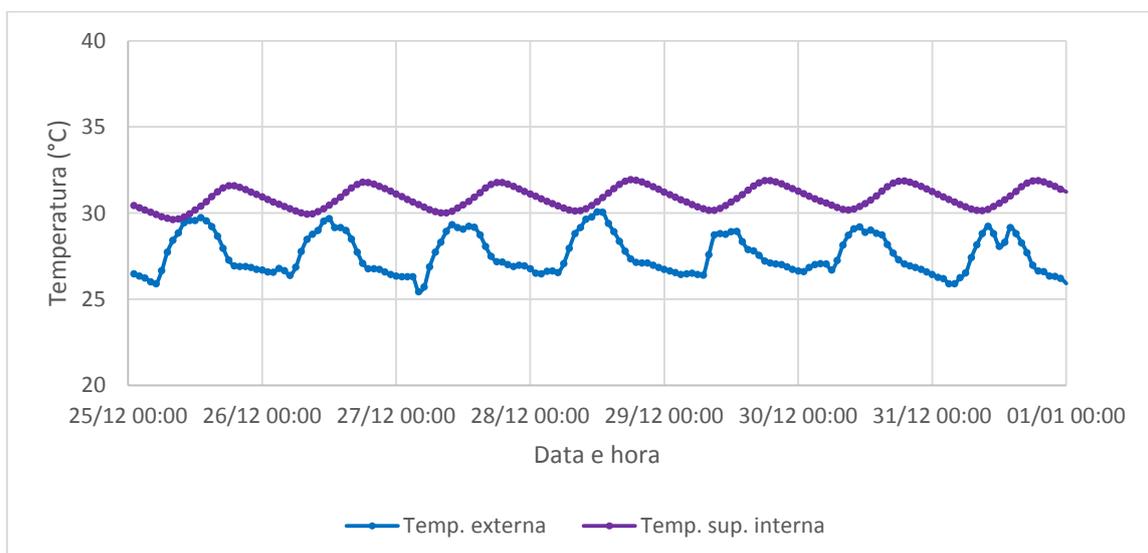
Conforme definido anteriormente, essa simulação ocorreu no protótipo com telhado intensivo e com parede diatérmica. Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação seca, estão representados no Quadro 20 e nos Gráficos 25 a 27.

Quadro 20 - Dados de temperatura do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação seca.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	2,30	12,81	6,08
Temperatura média [°C]	30,90	34,56	30,43
Temperatura máxima [°C]	31,93	42,57	33,78

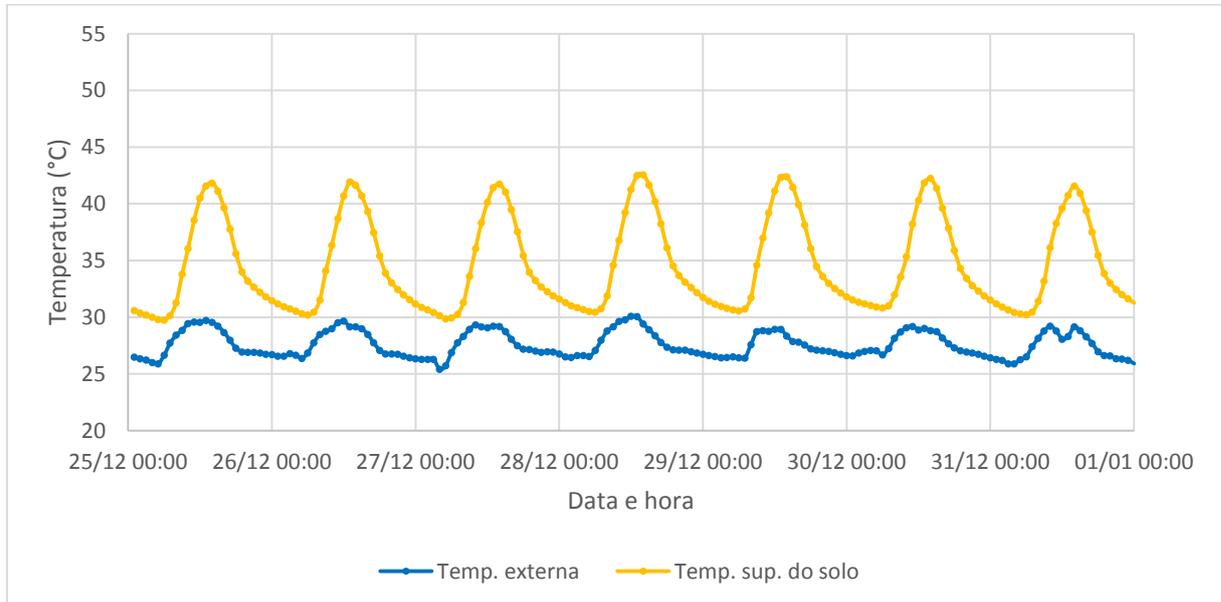
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 25 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação seca.



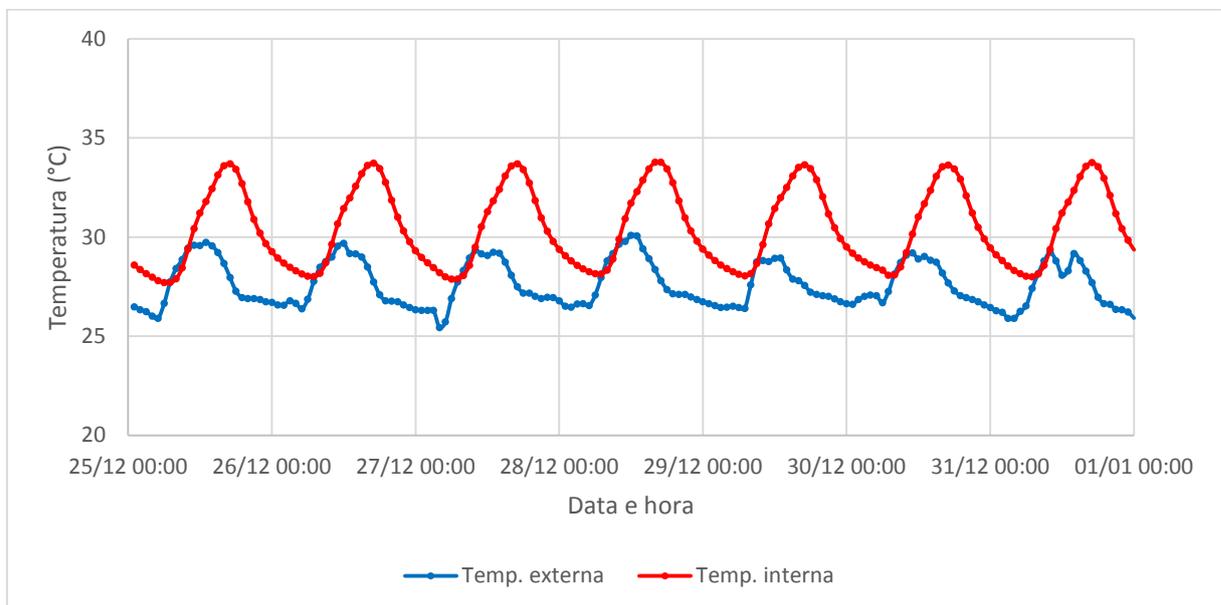
Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 26 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 27 - Temperatura interna do protótipo com telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação seca, o atraso térmico foi de aproximadamente 5,29 h e as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 7 h às 10 h do dia 25/12; das 8 h às 9 h do dia 26/12; das 8 h às 9 h do dia 27/12; das 8 h às 9 h do dia 28/12; às

9 h do dia 29/12; das 8 h às 9 h do dia 30/12 e das 8 h às 9 h do dia 31/12. Nos horários citados, ocorreram picos de radiação solar, como pode ser visualizado no Apêndice A, proporcionando um aumento abrupto da temperatura externa. Em função do atraso térmico, a temperatura interna continuou inferior à externa durante as primeiras horas após a ocorrência desses picos de radiação, como já explicado anteriormente.

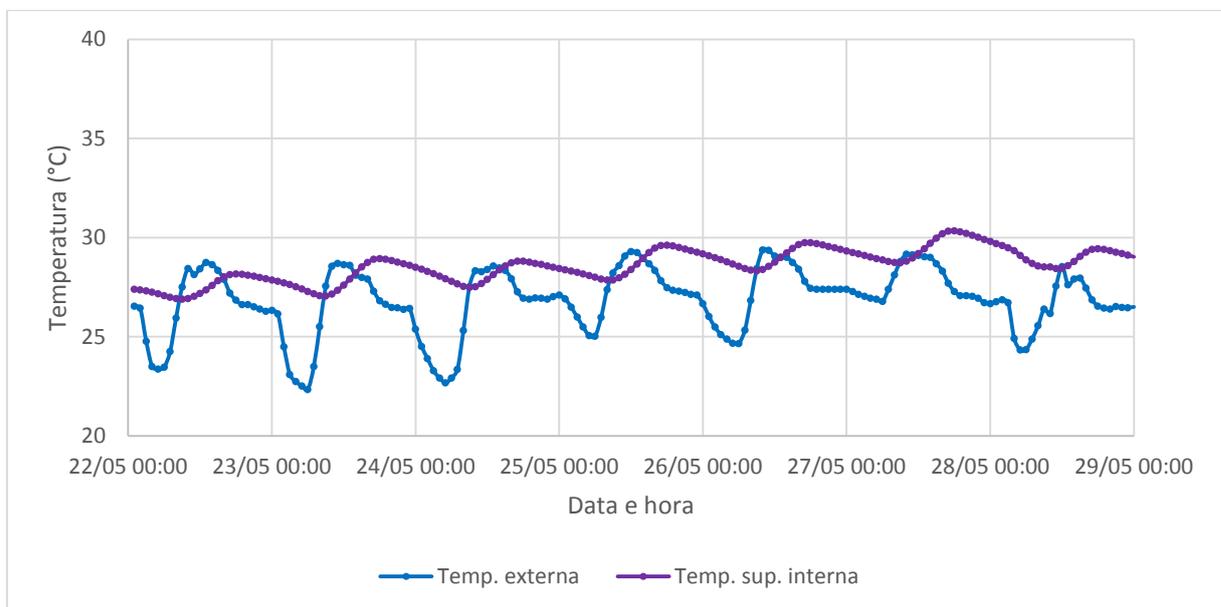
Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação chuvosa, estão representados no Quadro 21 e nos Gráficos 28 a 30.

Quadro 21 - Dados de temperatura do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação chuvosa.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	3,46	10,91	6,93
Temperatura média [°C]	28,59	31,11	28,38
Temperatura máxima [°C]	30,34	37,61	32,34

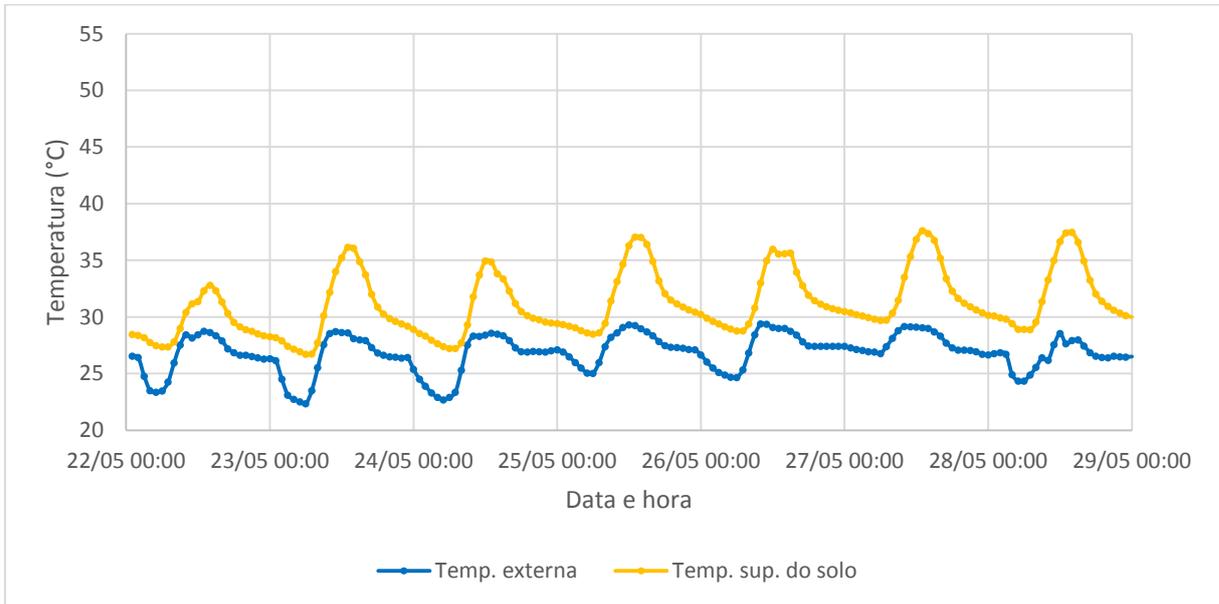
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 28 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação chuvosa.



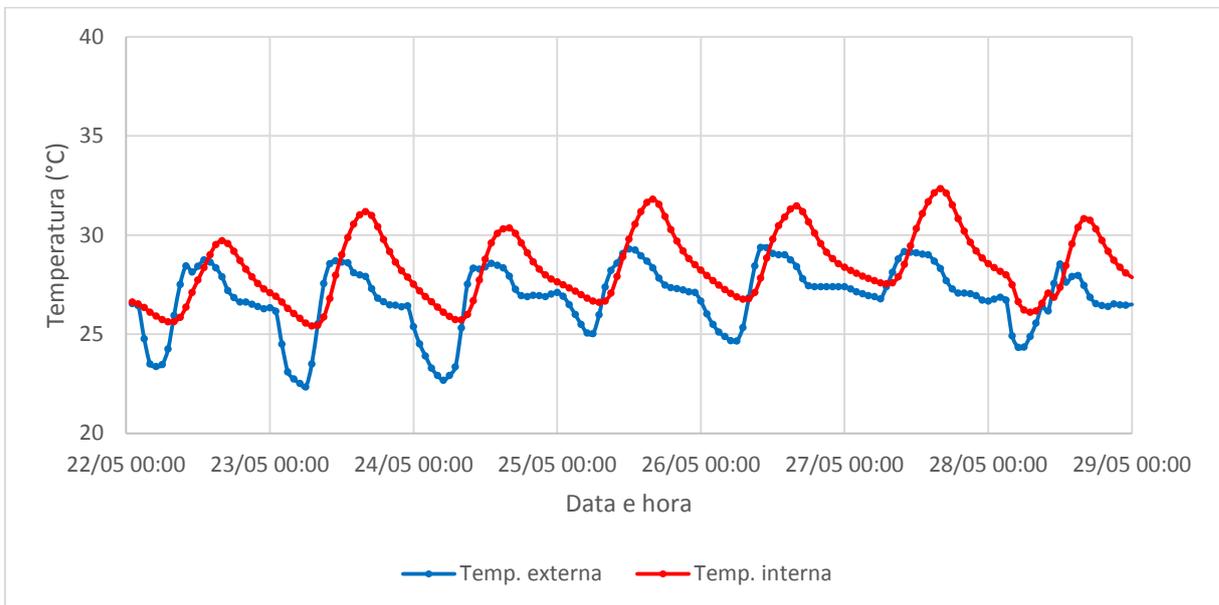
Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 29 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 30 - Temperatura interna do protótipo com telhado intensivo, com parede diatérmica (TIPD) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Já na estação chuvosa, o atraso térmico foi de 4,43 h e as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 8 h às 13 h do dia 22/05; das 8 h às 11 h do dia 23/05; das 09 h às 11 h do dia 24/05; das 8 h às 11 h do dia 25/05; das 8 h às 11 h do

dia 26/05; das 8 h às 10 h do dia 27/05 e das 11 h às 12 h do dia 28/05. Nesses períodos, ocorreram picos da radiação solar, o que ocasionou o aumento da temperatura externa. Por conta do atraso térmico, a temperatura interna continuou inferior à externa durante as primeiras horas após a ocorrência desses picos de radiação solar, como aconteceu nos casos anteriores.

5.2.6 Simulação TIPA

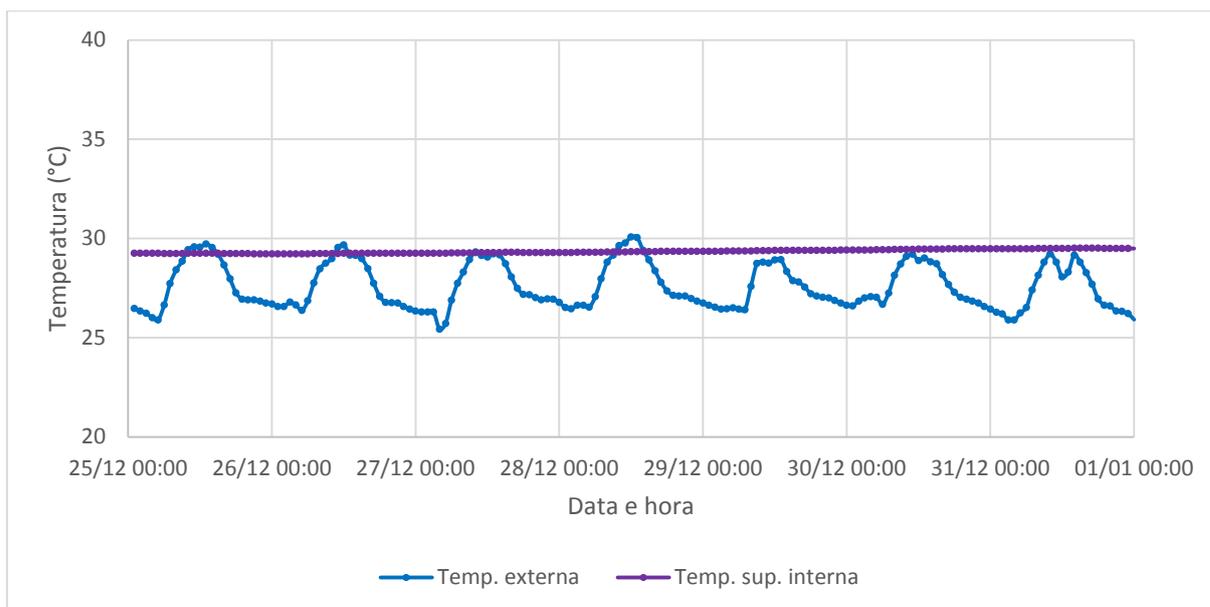
Como definido anteriormente, essa simulação ocorreu no protótipo com telhado intensivo e com parede adiabática. Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação seca, estão representados no Quadro 22 e nos Gráficos 31 a 33.

Quadro 22 - Dados de temperatura do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação seca.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	0,28	12,79	0,47
Temperatura média [°C]	29,35	34,44	28,69
Temperatura máxima [°C]	29,51	42,45	28,92

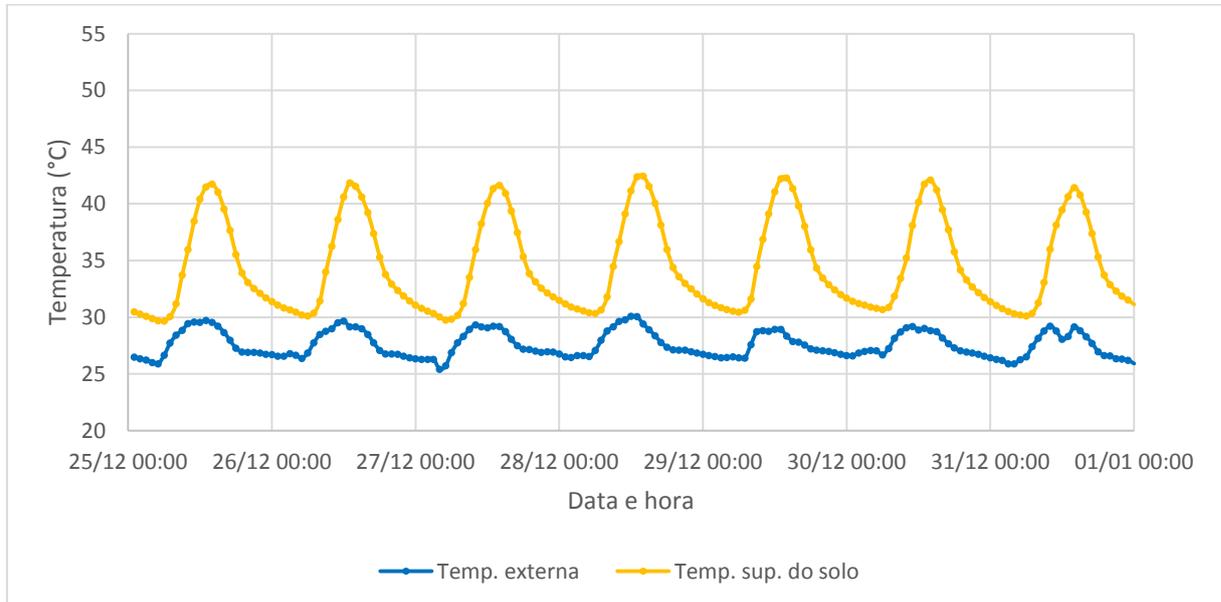
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 31 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação seca.



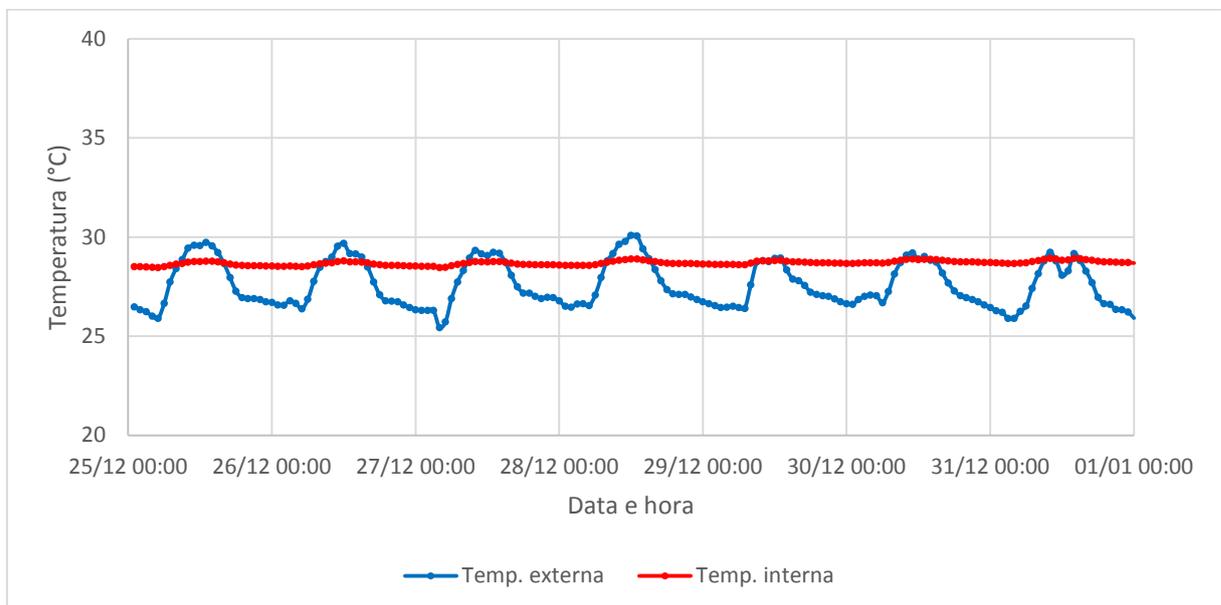
Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 32 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 33 - Temperatura interna do protótipo com telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Como se pode observar pelos Gráficos 31 e 33, a temperatura interna e a temperatura superficial interna sofreram pouca variação ao longo da semana, de forma semelhante ao que

ocorreu para o telhado extensivo, pelas mesmas razões já explicadas anteriormente. Ademais, os resultados foram condizentes com os obtidos nos trabalhos de Silva (2014) e Dias (2016).

Na estação seca, o atraso térmico foi de 1,28 h e as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 9 h às 15 h do dia 25/12; das 9 h às 15 h do dia 26/12; das 9 h às 14 h do dia 27/12; das 8 h às 15 h do dia 28/12; às 10 h e das 12 h às 13 h do dia 29/12; das 10 h às 13 h do dia 30/12; às 10 h e às 14 h do dia 31/12. Nos períodos citados, ocorreram picos de radiação solar, como pode ser visualizado no Apêndice A, que propiciaram um aumento da temperatura externa. Em função do atraso térmico, a temperatura interna manteve-se inferior à externa durante as primeiras horas após a ocorrência desses picos de radiação solar, como aconteceu nos casos anteriores.

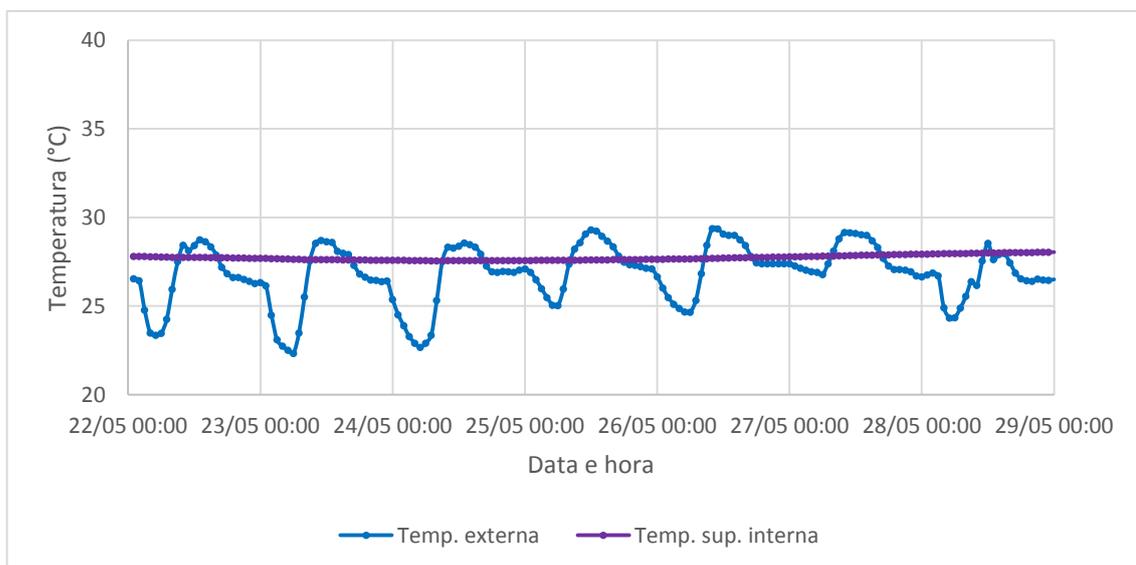
Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação chuvosa, estão representados no Quadro 23 e nos Gráficos 34 a 36.

Quadro 23 - Dados de temperatura do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação chuvosa.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	0,48	10,83	0,79
Temperatura média [°C]	27,73	31,09	27,37
Temperatura máxima [°C]	28,04	37,56	27,70

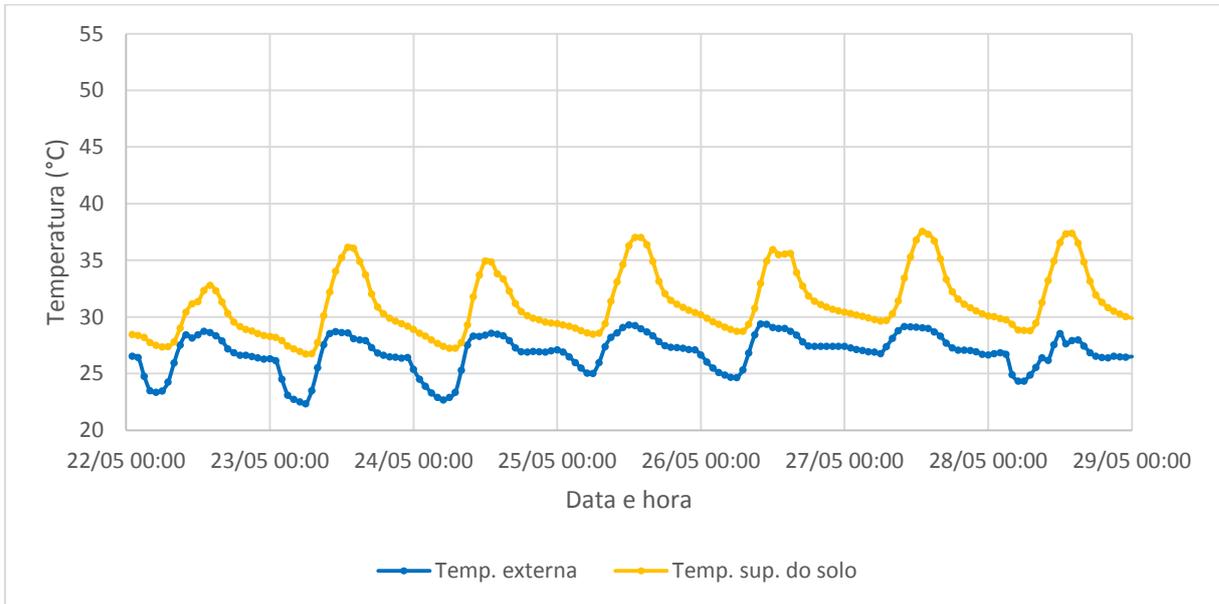
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 34 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação chuvosa.



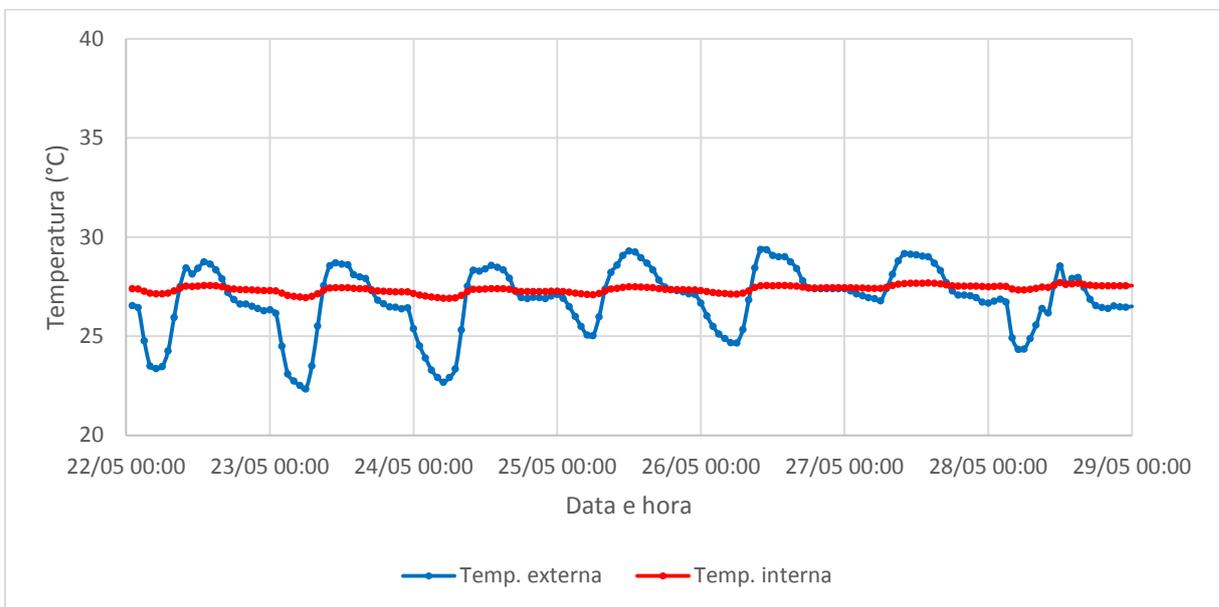
Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 35 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 36 - Temperatura interna do protótipo com telhado intensivo, com parede adiabática (TIPA) e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Como se pode observar pelos Gráficos 34 e 36, a temperatura interna e a temperatura superficial interna sofreram pouca variação ao longo da semana, de forma semelhante ao caso

anterior. Esses resultados foram condizentes com os obtidos nos trabalhos de Silva (2014) e Dias (2016), como ocorrido anteriormente.

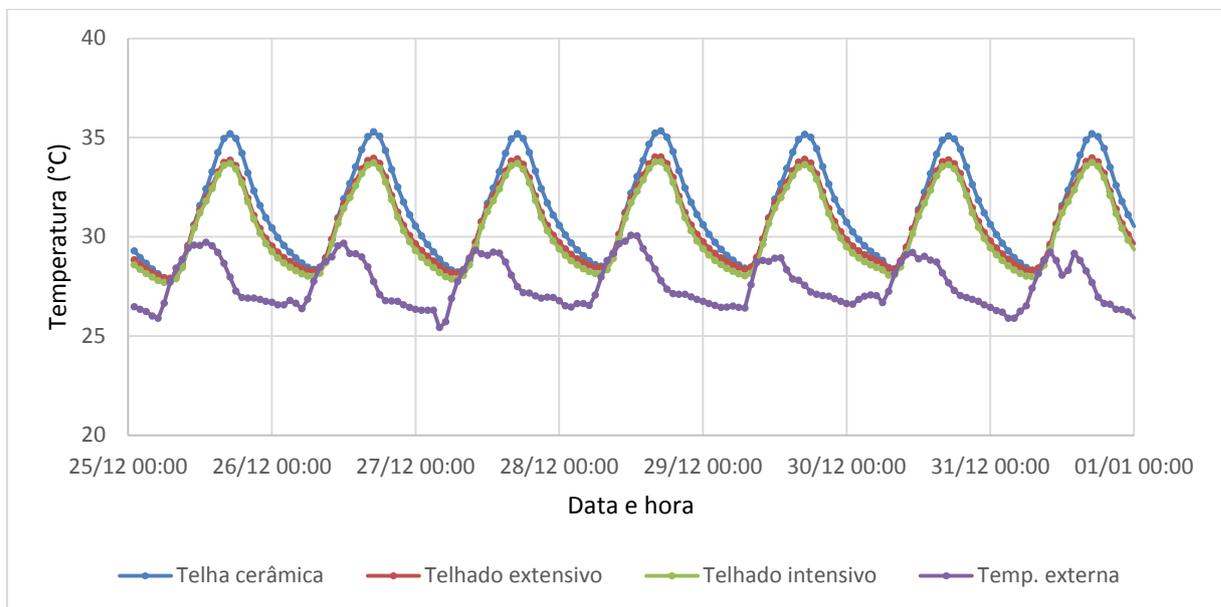
Já na estação chuvosa, o atraso térmico foi de 1,71 h e as temperaturas internas foram inferiores às externas nos seguintes dias e horários: das 9 h às 16 h do dia 22/05; das 9 h às 16 h do dia 23/05; das 9 h às 16 h do dia 24/05; das 8 h às 18 h do dia 25/05; das 9 h às 18 h do dia 26/05; das 8 h às 17 h do dia 27/05 e das 12 h às 15 h do dia 28/05. Nesses períodos, ocorreram picos de radiação solar, como pode ser conferido no Apêndice A, causando a elevação da temperatura externa. Por conta do atraso térmico, a temperatura interna permaneceu inferior à externa durante as primeiras horas após a ocorrência desses picos de radiação solar, como já explicado anteriormente.

5.2.7 Comparações entre as três tipologias de cobertura

5.2.7.1 Parede diatérmica

Os resultados das comparações das temperaturas internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação seca, estão representados no Gráfico 37.

Gráfico 37 - Temperaturas internas do protótipo com os diferentes tipos de cobertura, com parede diatérmica e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

Na estação seca, as temperaturas internas do protótipo com telha cerâmica foram inferiores às temperaturas do protótipo com telhado extensivo nos seguintes dias e horários: das 7 h às 10 h do dia 25/12; às 9 h do dia 26/12; das 8 h às 10 h do dia 27/12; das 9 h às 10 h

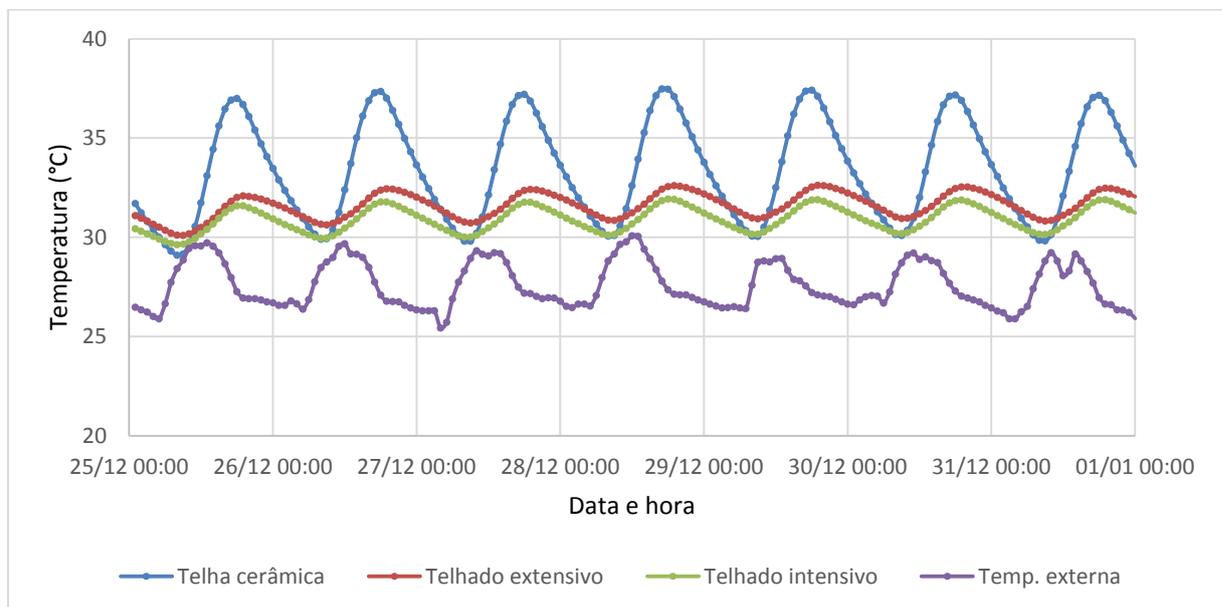
do dia 28/12; das 8 h às 10 h do dia 29/12; das 8 h às 10 h do dia 30/12 e das 8 h às 10 h dia 31/12.

Percebeu-se que durante o começo do dia, a telha cerâmica apresentou melhor desempenho que o telhado extensivo, fato que também ocorreu nos trabalhos de Ferraz (2012), Mendonça (2015) e Aranha (2016). Isso acontece porque a telha cerâmica, por ser porosa, absorve umidade do ar à noite. Essa umidade é eliminada durante as primeiras horas do dia, resfriando a telha e consequentemente o ambiente interno (BUENO, 1994).

Em média, a temperatura interna do protótipo com telha cerâmica foi $0,62\text{ }^{\circ}\text{C}$ mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado extensivo e $0,89\text{ }^{\circ}\text{C}$ mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação seca, estão representados no Gráfico 38.

Gráfico 38 - Temperaturas superficiais internas dos telhados, com parede diatérmica e na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

As temperaturas superficiais internas da telha cerâmica, na estação seca, foram inferiores às do telhado extensivo e às do telhado intensivo em alguns horários. Esse fato ocorreu em razão da telha cerâmica não esmaltada absorver umidade à noite e eliminá-la durante o início do dia, o que contribui na diminuição da sua temperatura superficial, como explicado no caso anterior (BUENO, 1994).

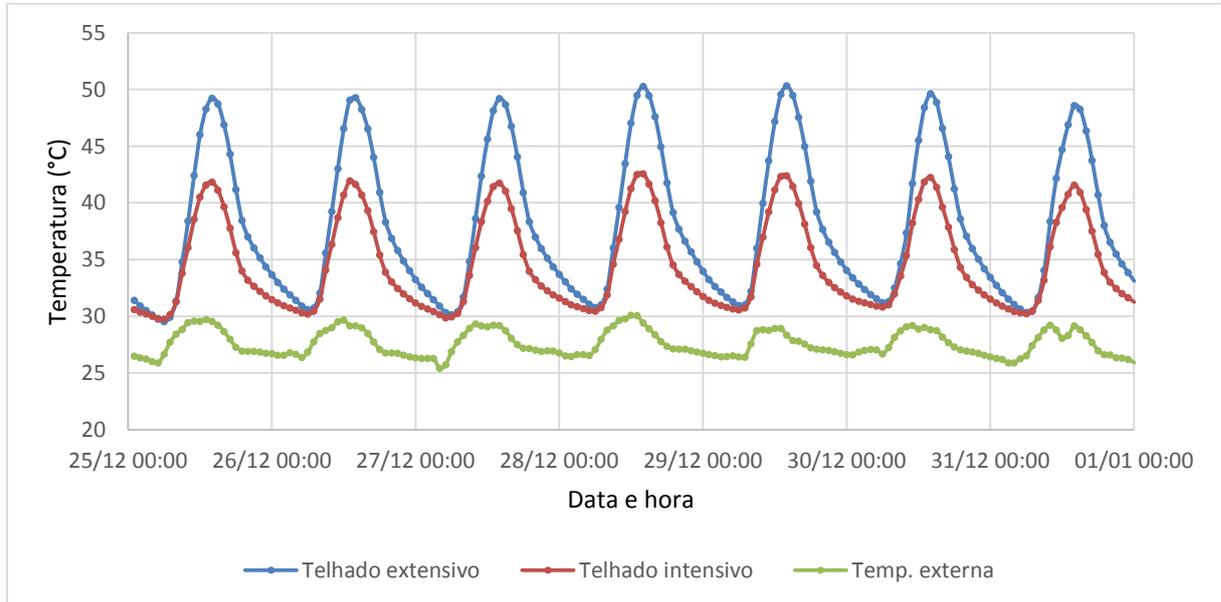
No caso do telhado extensivo, as temperaturas superficiais internas da telha cerâmica foram inferiores às do telhado extensivo nos seguintes dias e horários: das 3 h às 10 h do dia 25/12; das 5 h às 10 h do dia 26/12; das 5 h às 10 h do dia 27/12; das 5 h às 10 h do dia 28/12; das 4 h às 10 h do dia 29/12; das 5 h às 11 h do dia 30/12 e das 4 h às 11 h do dia 31/12.

No caso do telhado intensivo, as temperaturas superficiais internas da telha cerâmica foram inferiores às do telhado intensivo nos seguintes dias e horários: das 6 h às 10 h do dia 25/12; das 8 h às 9 h do dia 26/12; das 7 h às 9 h do dia 27/12; das 8 h às 9 h do dia 28/12; das 8 h às 9 h do dia 29/12; das 8 h às 9 h do dia 30/12 e das 7 h às 10 h do dia 31/12.

Em média, a temperatura superficial interna da telha cerâmica foi 1,75 °C mais elevada que a temperatura superficial interna do telhado extensivo e 2,46 °C mais elevada que a temperatura superficial interna do telhado extensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais externas do solo para o telhado extensivo e para o intensivo, para a estação seca, estão representados no Gráfico 39.

Gráfico 39 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados, com parede diatérmica e na estação seca.



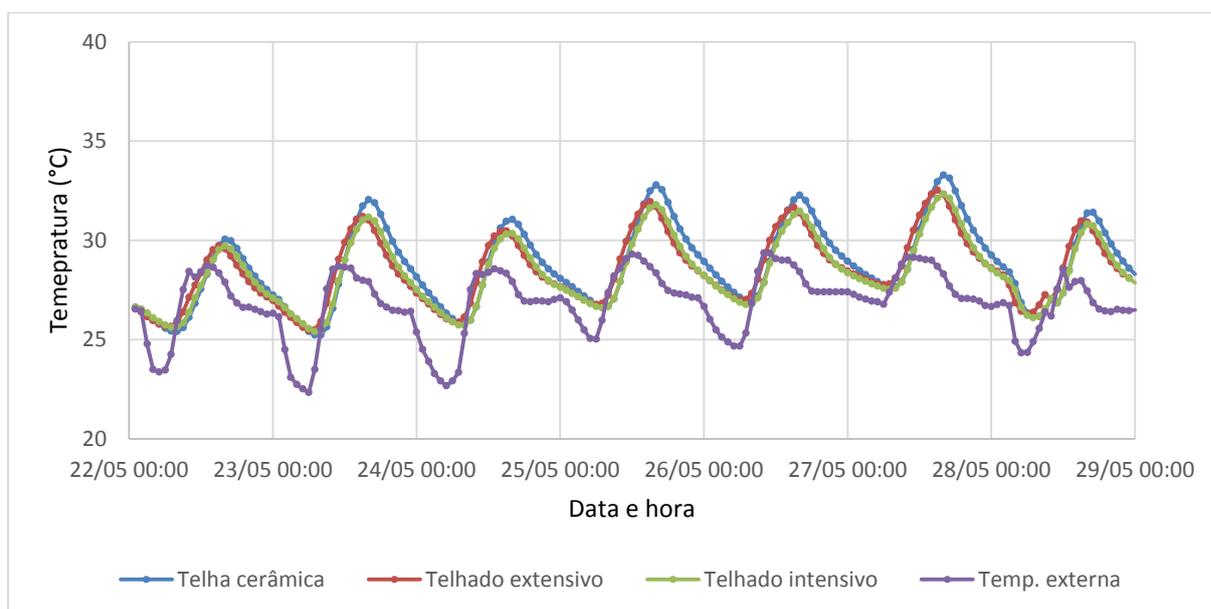
Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

Na estação seca, as temperaturas superficiais externas do solo do telhado extensivo foram inferiores às apresentadas pelo telhado intensivo das 5 h às 7 h do dia 25/12. Nesses horários, a radiação solar foi bastante baixa, reduzindo a taxa de evapotranspiração da vegetação. Uma vez que a vegetação do telhado intensivo possui maior IAF que a do

extensivo, o desempenho térmico do primeiro foi inferior ao do segundo nos horários citados, em razão da diminuição da taxa de evapotranspiração da vegetação. Em média, a temperatura superficial do solo do telhado extensivo foi 3,31 °C mais elevada que a temperatura do solo do telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação chuvosa, estão representados no Gráfico 40.

Gráfico 40 - Temperaturas internas do protótipo com os diferentes tipos de cobertura, com parede diatérmica e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação chuvosa, as temperaturas internas no protótipo com telha cerâmica foram inferiores às temperaturas do protótipo com telhado extensivo e às do telhado intensivo em alguns horários. Como explicado anteriormente, a telha cerâmica absorve umidade durante o período noturno, que é eliminada durante as primeiras horas da manhã. É importante salientar que no período chuvoso, como a telha cerâmica absorve mais umidade, em razão do maior índice de precipitação, o desempenho térmico da mesma é superior ao apresentado no período seco. Além disso, no período chuvoso, a taxa de evapotranspiração do telhado verde diminuiu, contribuindo para a piora do seu desempenho térmico (BUENO, 1994; THEODOSIOU, 2003).

No caso do telhado extensivo, as temperaturas internas do protótipo com telha cerâmica foram inferiores às temperaturas do protótipo com telhado extensivo nos seguintes

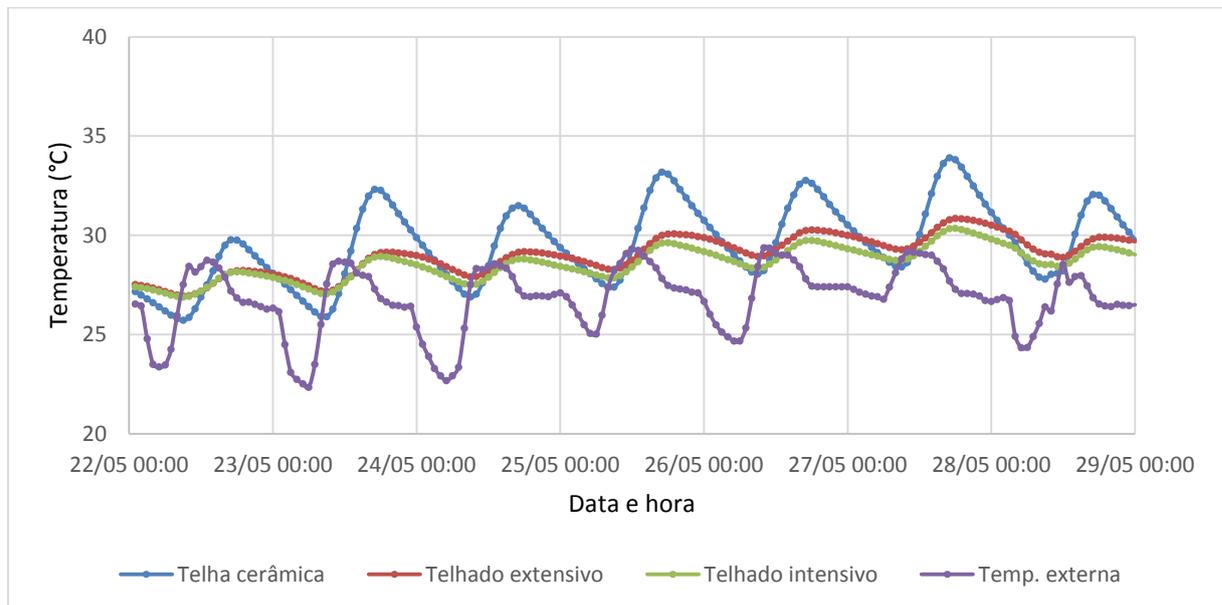
dias e horários: das 1 h às 13 h do dia 22/05; das 2 h às 12 h do dia 23/05; das 6 h às 12 h do dia 24/05; das 5 h às 11 h do dia 25/05; das 7 h às 11 h do dia 26/05; das 5 h às 11 h do dia 27/05 e das 5 h às 13 h do dia 28/05.

No caso do telhado intensivo, as temperaturas internas do protótipo com telha cerâmica foram inferiores às temperaturas do protótipo com telhado intensivo nos seguintes dias e horários: das 2 h às 13 h do dia 22/05; das 3 h às 12 h do dia 23/05; das 9 h às 10 h do dia 24/05; às 9 h do dia 25/05 e das 9 h às 12 h do dia 28/05.

Em média, a temperatura interna do protótipo com telha cerâmica foi 0,22 °C mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado extensivo e 0,37 °C mais elevada que a do protótipo com telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais internas para os três tipos de cobertura, para a estação chuvosa, estão representados no Gráfico 41.

Gráfico 41 - Temperaturas superficiais internas dos telhados, com parede diatérmica e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

As temperaturas superficiais internas da telha cerâmica, na estação chuvosa, foram inferiores às temperaturas do telhado extensivo e do telhado intensivo em alguns horários. Como já explanado para os outros casos, esse fato ocorreu por dois motivos principais: a telha cerâmica absorve umidade à noite, que é eliminada nas primeiras horas do período diurno e a

taxa de evapotranspiração da vegetação diminui nos períodos chuvosos, o que contribui para a piora do desempenho térmico do telhado verde (BUENO, 1994; THEODOSIOU, 2003).

No caso do telhado extensivo, as temperaturas superficiais internas da telha cerâmica foram inferiores às temperaturas do telhado extensivo nos seguintes dias e horários: das 1 h às 12 h do dia 22/05; das 1 h às 11 h do dia 23/05; das 4 h às 11 h do dia 24/05; das 3 h às 11 h do dia 25/05; das 4 h às 11 h do dia 26/05; das 3 h às 11 h do dia 27/05 e das 3 h às 12 h do dia 28/05.

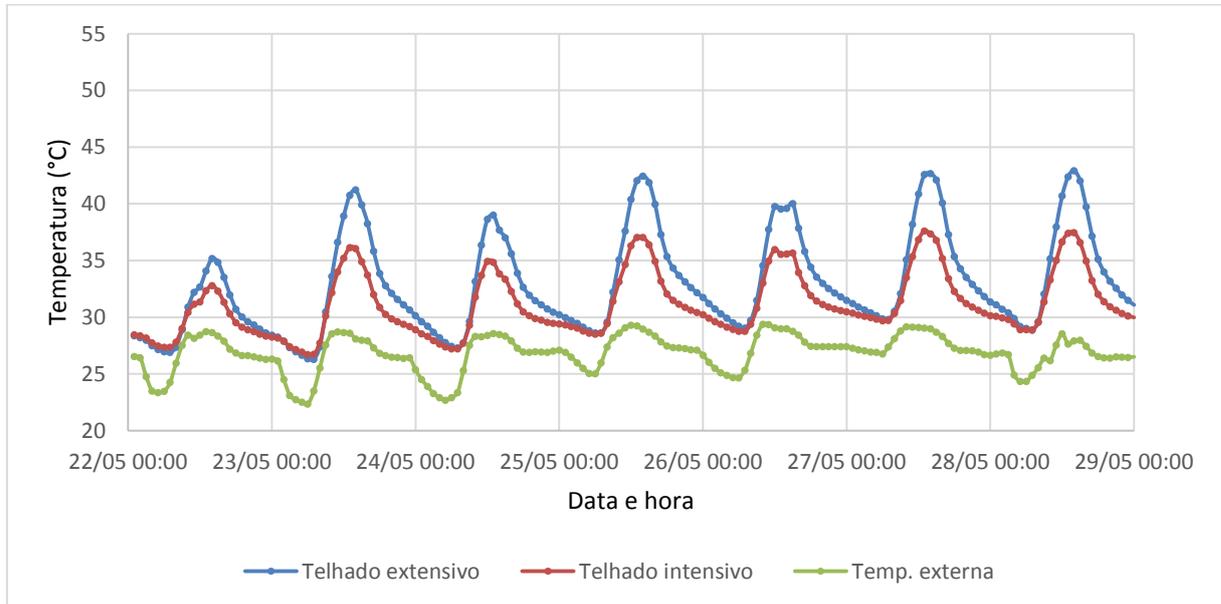
No caso do telhado intensivo, as temperaturas superficiais internas da telha cerâmica foram inferiores às do telhado intensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 12 h do dia 22/05; das 2 h às 11 h do dia 23/05; das 6 h às 11 h do dia 24/05; das 5 h às 10 h do dia 25/05; das 7 h às 10 h do dia 26/05; das 7 h às 10 h do dia 27/05 e das 6 h às 12 h do dia 28/05.

As temperaturas superficiais internas do telhado verde extensivo foram inferiores às do telhado verde intensivo das 13 h às 15 h, no dia 22/05, contudo essa diferença foi ínfima, da ordem de 0,01 °C.

Em média, a temperatura superficial interna da telha cerâmica foi 0,58 °C mais elevada que a temperatura superficial interna do telhado extensivo e 0,99 °C mais elevada que a temperatura superficial interna do telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais externas do solo para o telhado extensivo e o intensivo, no caso da estação chuvosa, estão representados no Gráfico 42.

Gráfico 42 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados, com parede diatérmica e na estação chuvosa.



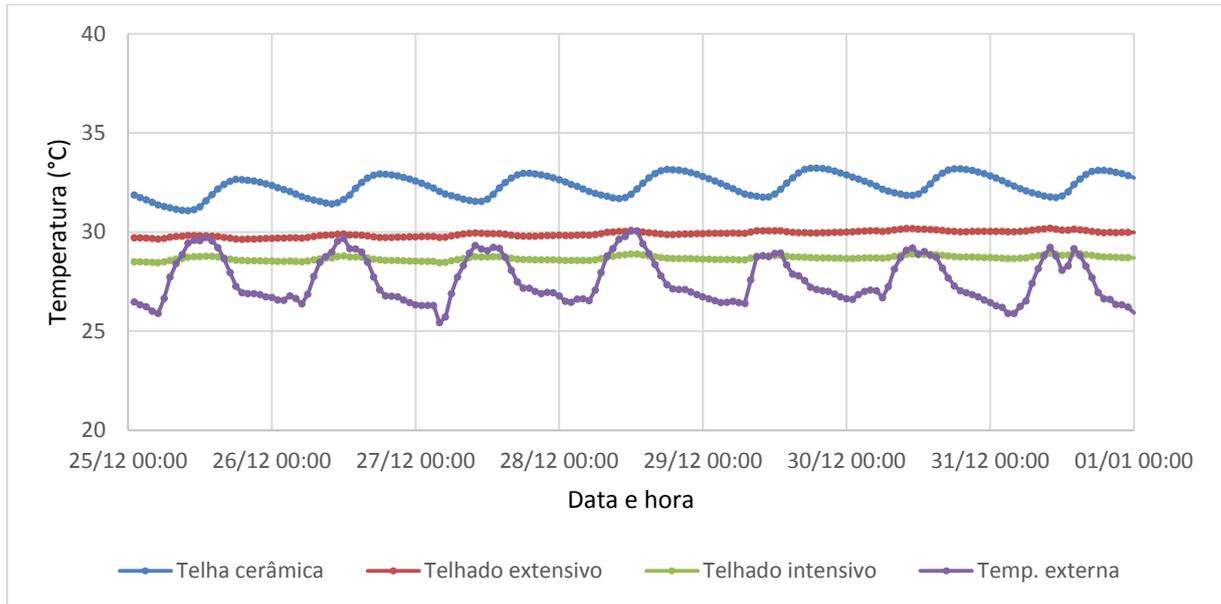
Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

Na estação chuvosa, as temperaturas superficiais externas do telhado verde extensivo foram inferiores às do telhado intensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 9 h do dia 22/05 e das 3 h às 8 h do dia 23/05. Nesse período, a radiação solar foi bastante baixa, o que diminuiu a taxa de evapotranspiração da vegetação. Como a vegetação do telhado intensivo é mais densa em relação à do extensivo, o desempenho térmico do primeiro foi inferior ao segundo nos períodos citados, em razão da redução da taxa de evapotranspiração. Em média, a temperatura do solo do telhado extensivo chegou a ser 1,79 °C mais elevada que a temperatura do solo do telhado intensivo.

5.2.7.2 Parede adiabática

Os resultados das comparações das temperaturas internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação seca, estão representados no Gráfico 43.

Gráfico 43 - Temperaturas internas do protótipo com os diferentes tipos de cobertura, com parede adiabática e na estação seca.

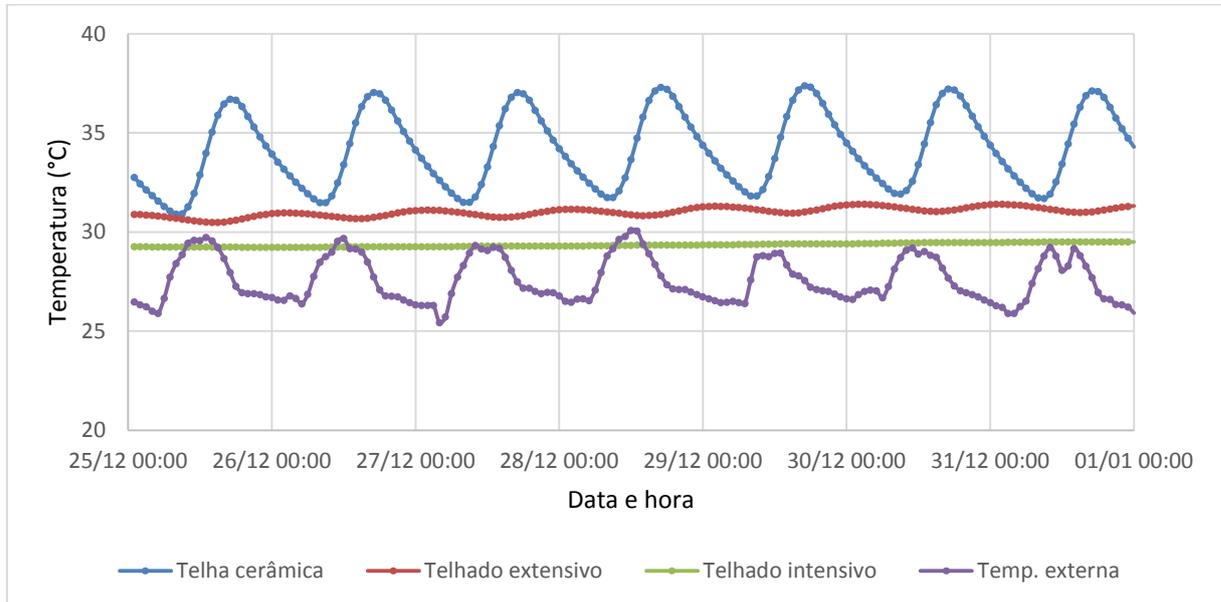


Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

Como pode ser inferido pela análise do Gráfico 44, em nenhum momento, as temperaturas internas do protótipo com telha cerâmica foram inferiores às do telhado extensivo e às do telhado intensivo, na estação seca. Em média, a temperatura interna do protótipo com telha cerâmica foi 2,42 °C mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado extensivo e 3,65 °C mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado intensivo. Esse resultado confirma que o telhado intensivo é o que apresenta melhor desempenho térmico dentre as três tipologias analisadas.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação seca, estão representados no Gráfico 44.

Gráfico 44 - Temperaturas superficiais internas dos telhados, com parede adiabática e na estação seca.

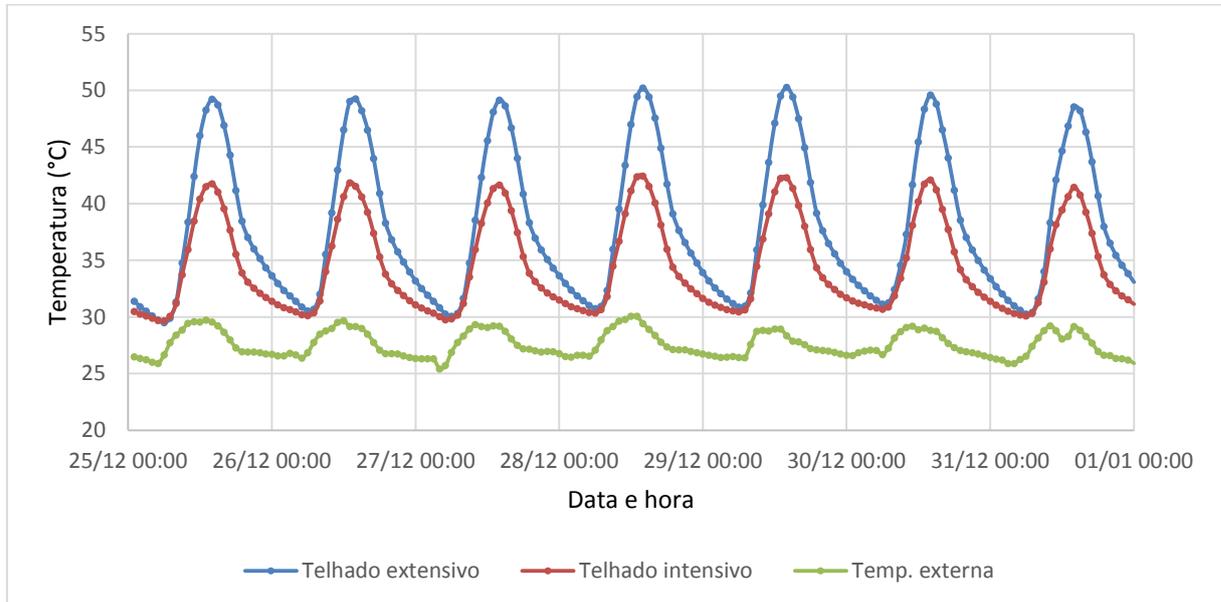


Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

Pela análise do Gráfico 45, percebe-se que em nenhum momento, as temperaturas superficiais internas da telha cerâmica foram inferiores às do telhado extensivo e às do telhado intensivo, na estação seca. Em média, a temperatura superficial interna da telha cerâmica foi 3,14 °C mais elevada que a do telhado intensivo e 4,81 °C mais elevada que a do telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais externas do solo para o telhado extensivo e o intensivo, no caso da estação seca, estão representados no Gráfico 45.

Gráfico 45 - Temperaturas superficiais externas dos telhados, com parede adiabática e na estação seca.

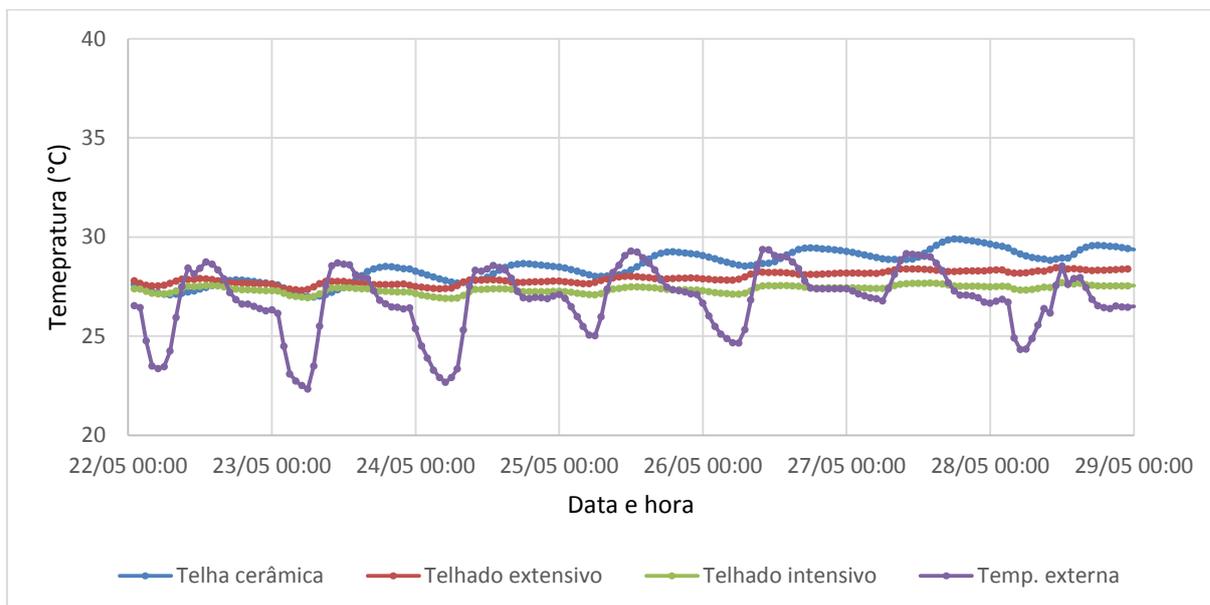


Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

Na estação seca, as temperaturas superficiais externas do solo do telhado extensivo foram inferiores às apresentadas pelo telhado verde intensivo das 6 h às 7 h do dia 25/12. Nesse período, a radiação solar foi bastante baixa, o que diminuiu a taxa de evapotranspiração da vegetação. Como a vegetação do telhado intensivo é mais densa em comparação com a do extensivo, o desempenho térmico do primeiro foi inferior ao segundo nesse período, por conta da diminuição da taxa de evapotranspiração. Em média, a temperatura do solo do telhado intensivo foi $3,37^{\circ}\text{C}$ inferior à temperatura do solo do telhado extensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação chuvosa, estão representados no Gráfico 46.

Gráfico 46 - Temperaturas internas do protótipo com os diferentes tipos de cobertura, com parede adiabática e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação chuvosa, as temperaturas internas do protótipo com telha cerâmica foram inferiores às do protótipo com telhado extensivo e com telhado intensivo em alguns momentos. Essas situações aconteceram em virtude do fato de a telha cerâmica absorver umidade à noite, que é eliminada durante o dia (BUENO, 1994).

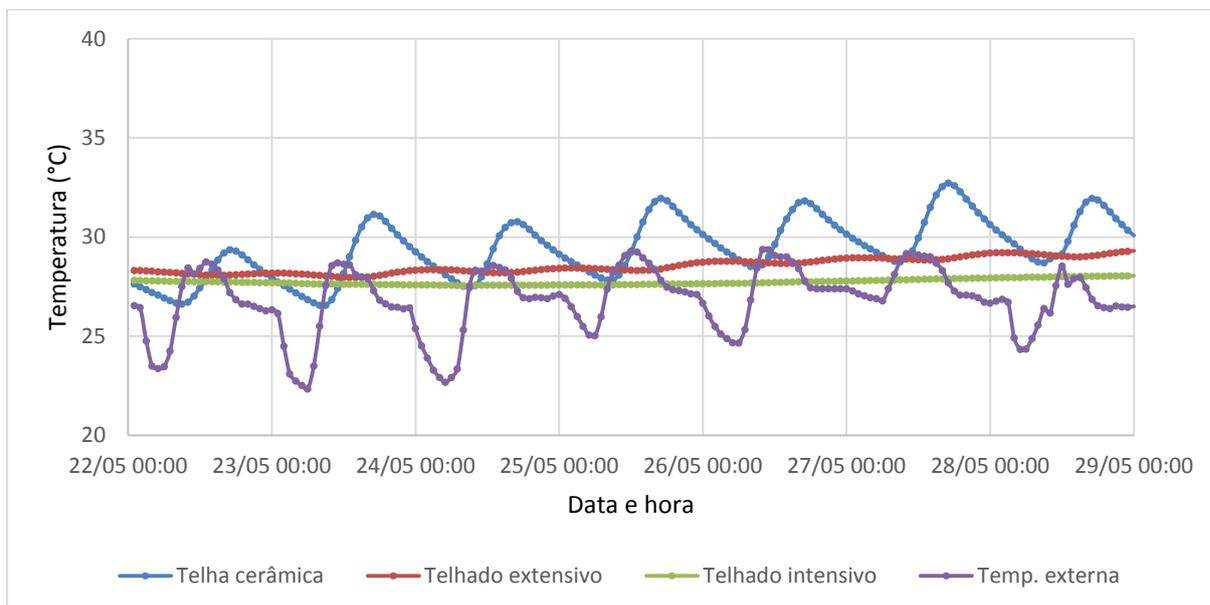
No caso do telhado extensivo, as temperaturas internas do protótipo com telha cerâmica foram inferiores às temperaturas do protótipo com telhado extensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 16 h do dia 22/05 e de 0 h às 13 h do dia 23/05.

No caso do telhado intensivo, as temperaturas internas do protótipo com telha cerâmica foram inferiores às temperaturas do protótipo com telhado intensivo nos seguintes dias e horários: das 6 h às 13 h do dia 22/05 e das 7 h às 11 h do dia 23/05.

Em média, a temperatura interna do protótipo com telha cerâmica foi 0,59 °C mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado extensivo e 1,16 °C mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação chuvosa, estão representados no Gráfico 47.

Gráfico 47 - Temperaturas superficiais internas dos telhados, com parede adiabática e na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

As temperaturas superficiais internas da telha cerâmica, na estação chuvosa, foram inferiores às do telhado extensivo e às do telhado intensivo em alguns momentos. Isso ocorreu em razão de a telha cerâmica absorver umidade no período noturno, que é eliminada durante o dia, como aconteceu nos outros casos (BUENO, 1994).

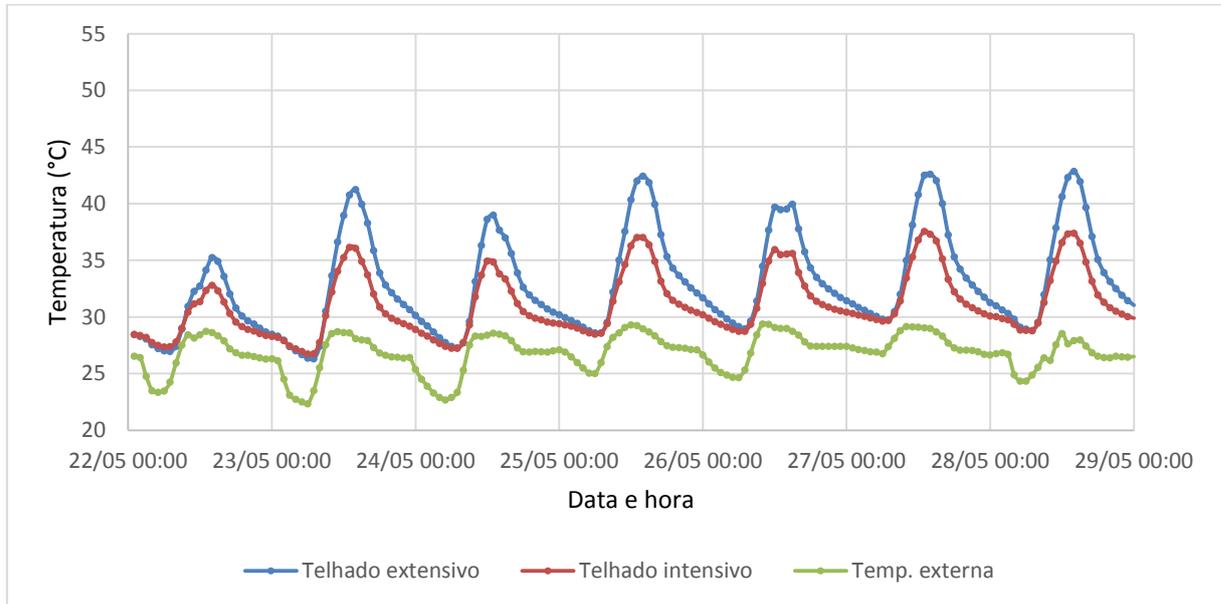
No caso do telhado extensivo, as temperaturas superficiais internas da telha cerâmica foram inferiores às do telhado extensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 13 h do dia 22/05; de 0 h às 11 h do dia 23/05; das 4 h às 11 h do dia 24/05; das 4 h às 10 h do dia 25/05; das 7 h às 10 h do dia 26/05; das 7 h às 9 h do dia 27/05 e das 6 h às 11 h do dia 28/05.

No caso do telhado intensivo, as temperaturas superficiais internas da telha cerâmica foram inferiores às do telhado intensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 12 h do dia 22/05; das 2 h às 11 h do dia 23/05 e das 8 h às 10 h do dia 24/05.

Em média, a temperatura superficial interna da telha cerâmica foi 0,89 °C mais elevada que a temperatura superficial interna do telhado extensivo e 1,71 °C mais elevada que a temperatura superficial interna do telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais externas para o telhado extensivo e o intensivo, para a estação seca, estão representados no Gráfico 48.

Gráfico 48 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados, com parede adiabática e na estação chuvosa.



Na estação chuvosa, as temperaturas superficiais externas do telhado verde extensivo foram inferiores às do telhado intensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 9 h do dia 22/05; das 3 h às 8 h do dia 23/05; às 8 h do dia 24/05 e às 7 h do dia 28/05. Nos períodos citados, a radiação solar foi bastante baixa, o que reduziu a taxa de evapotranspiração da vegetação. Uma vez que a vegetação do telhado intensivo é mais densa em comparação com a do extensivo, o desempenho térmico do primeiro foi inferior ao segundo nesses horários, em virtude da diminuição da taxa de evapotranspiração. Em média, a temperatura superficial do solo do telhado extensivo foi 1,79° C mais elevada que a temperatura do solo do telhado intensivo.

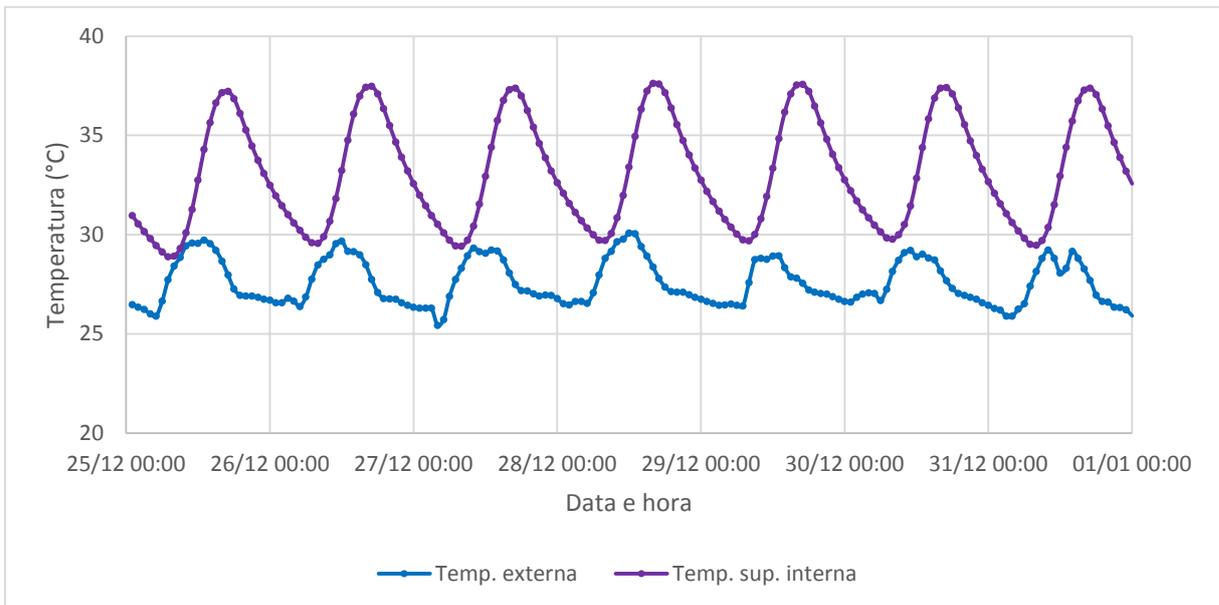
5.2.8 Simulação SC

Como já definido, essa simulação ocorreu na sala de aula com telha cerâmica. Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação seca, estão representados no Quadro 24 e nos Gráficos 49 e 50.

Quadro 24 - Dados de temperatura da telha cerâmica (SC) na estação seca.

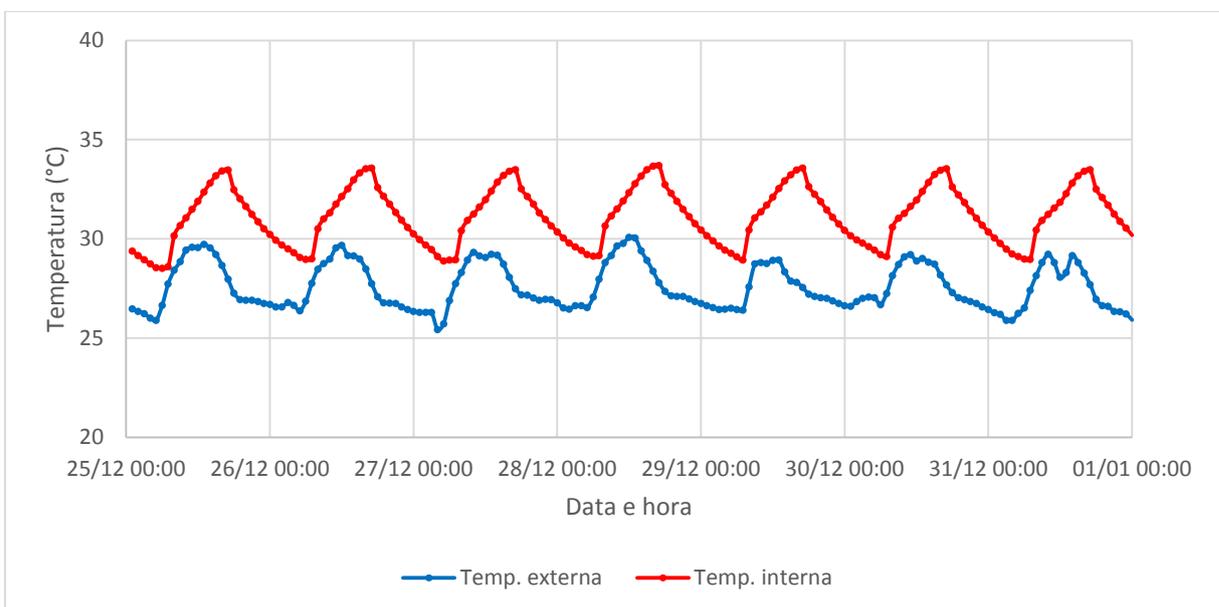
	Temperatura superficial interna	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	8,73	5,18
Temperatura média [°C]	33,10	31,14
Temperatura máxima [°C]	37,62	33,69

Gráfico 49 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica (SC) na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 50 - Temperatura interna do ambiente com telha cerâmica (SC) na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

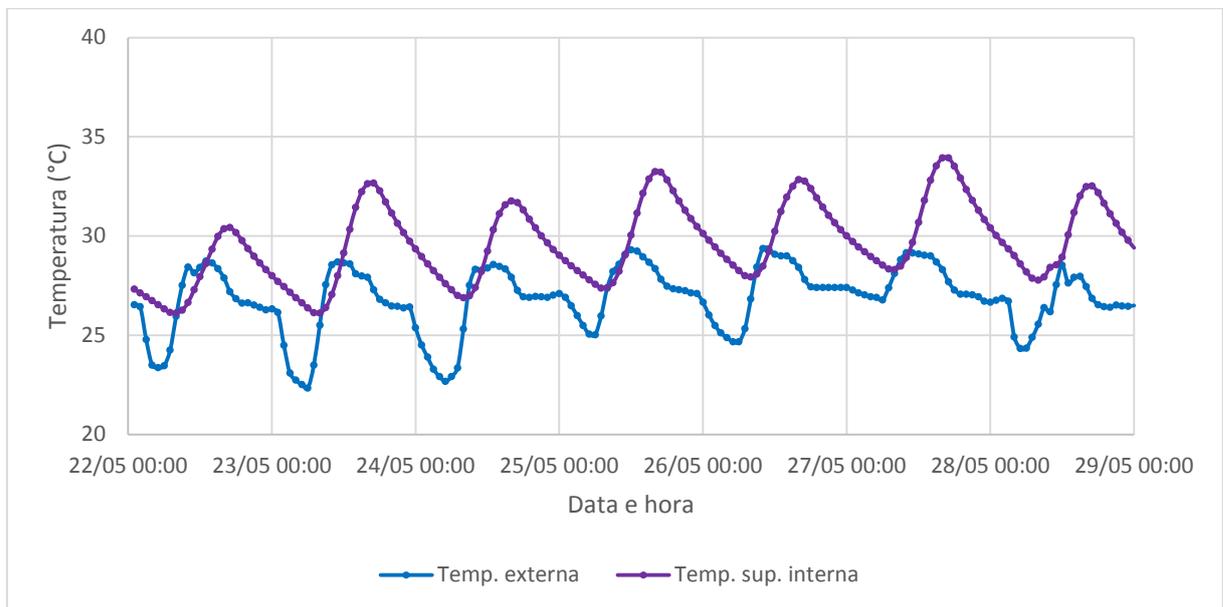
Na estação seca, em nenhum momento, a temperatura interna foi inferior à temperatura externa e o atraso térmico, por sua vez, foi de aproximadamente 5,57 h.

Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação chuvosa, estão representados no Quadro 25 e nos Gráficos 51 e 52.

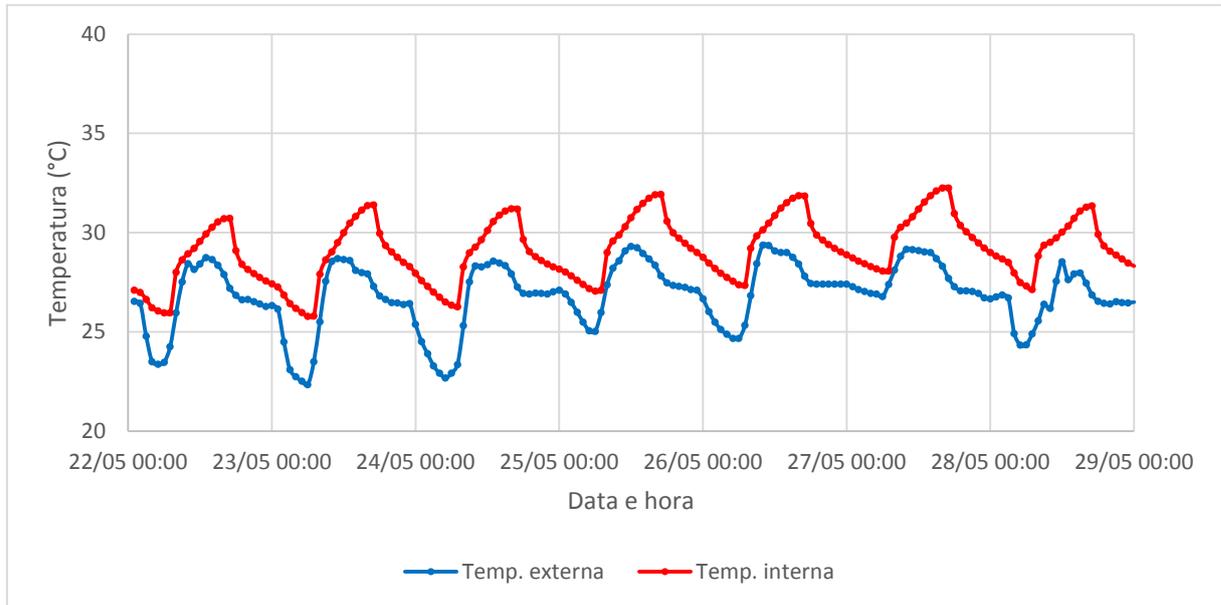
Quadro 25 - Dados de temperatura da telha cerâmica (SC) na estação chuvosa.

	Temperatura superficial interna	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	7,82	6,47
Temperatura média [°C]	29,62	29,11
Temperatura máxima [°C]	33,94	32,25

Gráfico 51 - Temperatura superficial interna da telha cerâmica (SC) na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 52 - Temperatura interna do ambiente com telha cerâmica (SC) na estação chuvosa.

Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação chuvosa, em nenhum momento, a temperatura interna foi inferior à temperatura externa e o atraso térmico, por sua vez, foi de 5 h.

5.2.9 Simulação SE

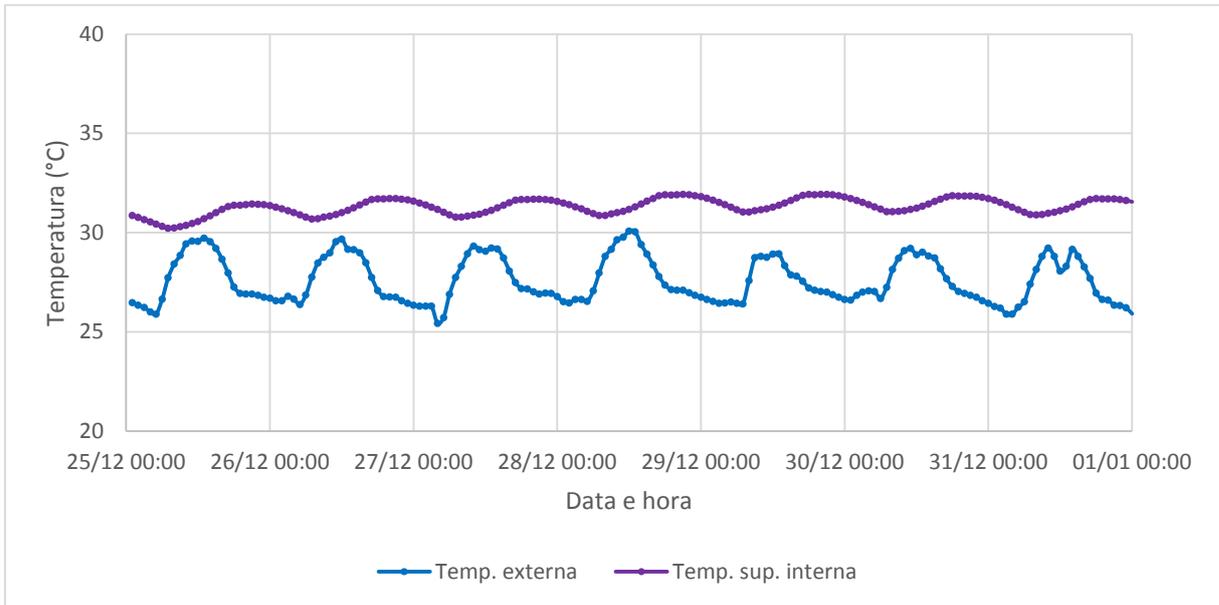
Conforme já definido, essa simulação ocorreu na sala de aula com telhado extensivo. Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação seca, estão representados no Quadro 26 e nos Gráficos 53 a 55.

Quadro 26 - Dados de temperatura do telhado extensivo (SE) na estação seca.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	1,71	20,88	3,77
Temperatura média [°C]	31,32	37,86	30,36
Temperatura máxima [°C]	31,93	50,36	32,26

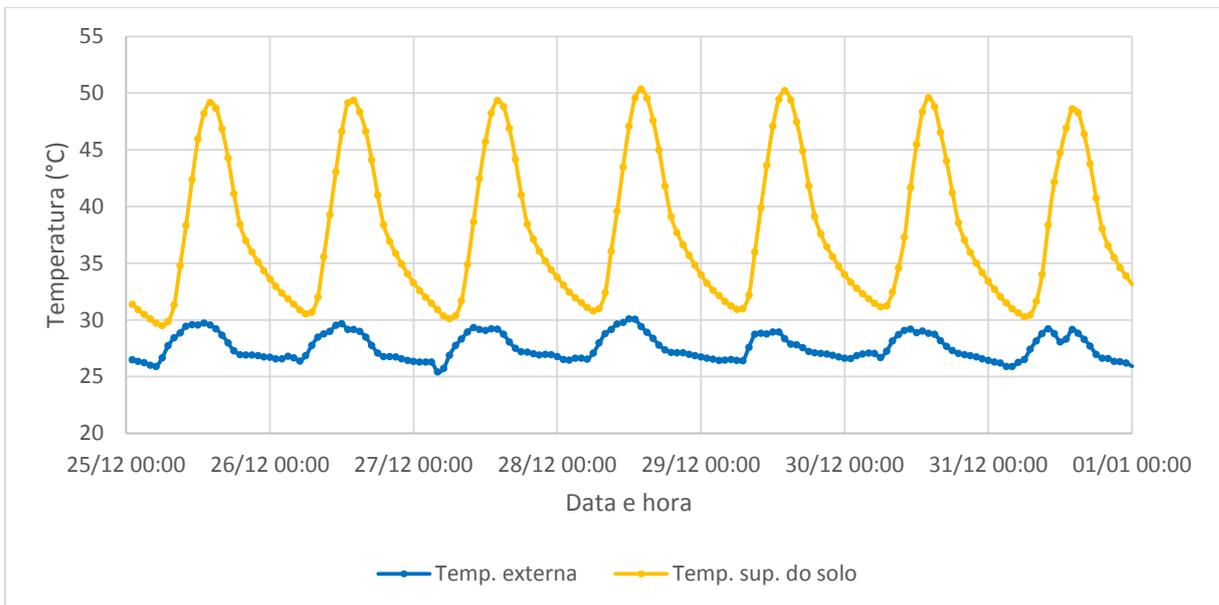
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 53 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo (SE) na estação seca.

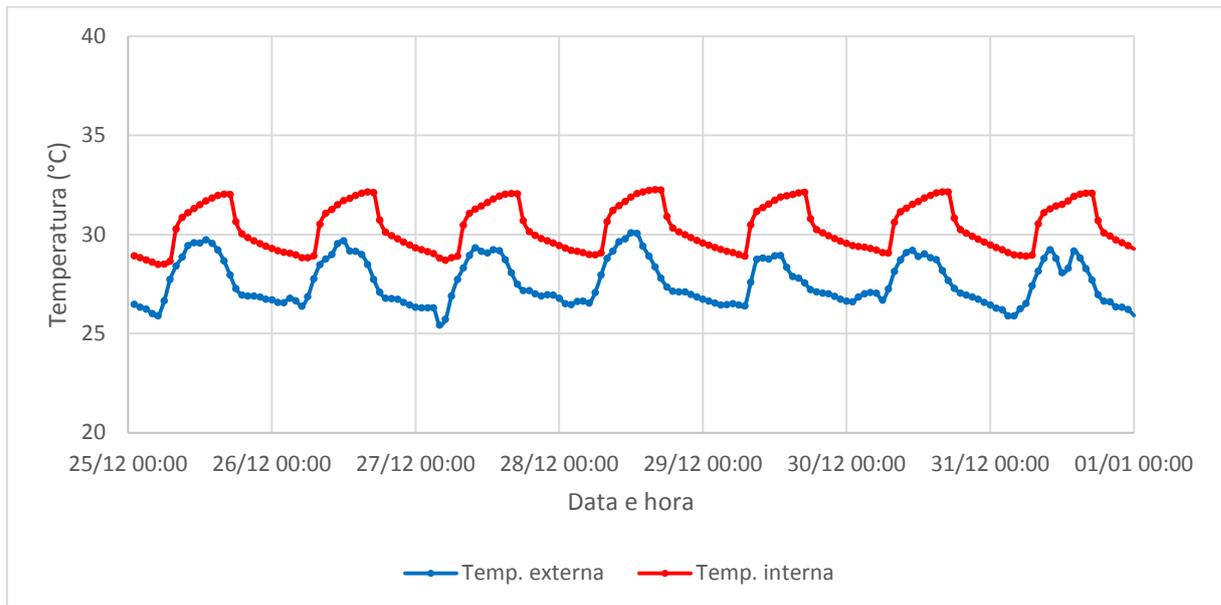


Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 54 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo (SE) na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 55 - Temperatura interna do ambiente com telhado extensivo (SE) na estação seca.

Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação seca, o atraso térmico foi de 4,86 h e em nenhum momento, a temperatura interna foi inferior à temperatura externa. Esse baixo desempenho térmico ocorreu devido à presença de janelas na sala, visto que a janela é o elemento do edifício que permite a maior entrada de calor (OLGYAY; OLGAYAY, 1957 apud DIAS, 2011).

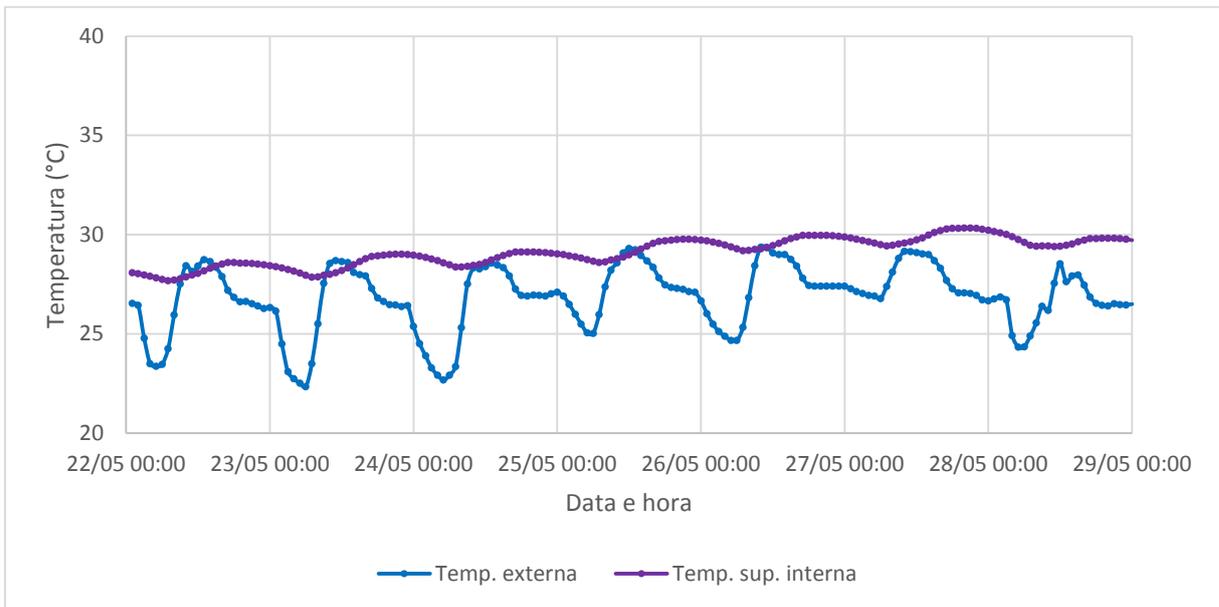
Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação chuvosa, estão representados no Quadro 27 e nos Gráficos 56 a 58.

Quadro 27 - Dados de temperatura do telhado extensivo (SE) na estação chuvosa.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	2,66	16,60	5,27
Temperatura média [°C]	29,13	32,89	28,91
Temperatura máxima [°C]	30,33	42,92	31,44

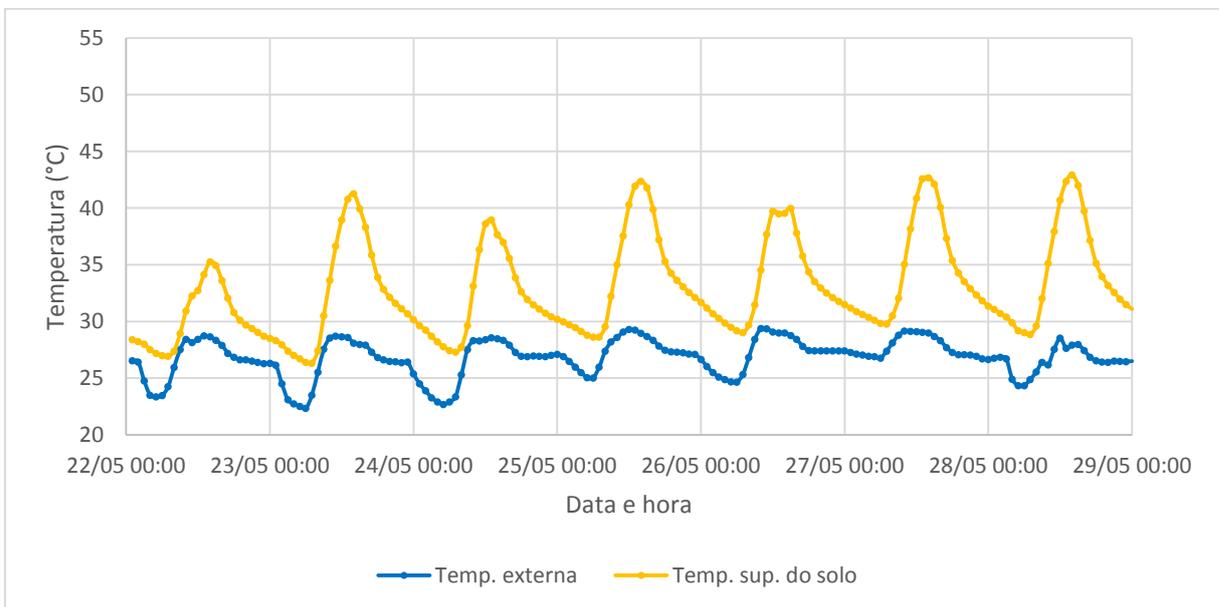
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 56 - Temperatura superficial interna do telhado extensivo (SE) na estação chuvosa.

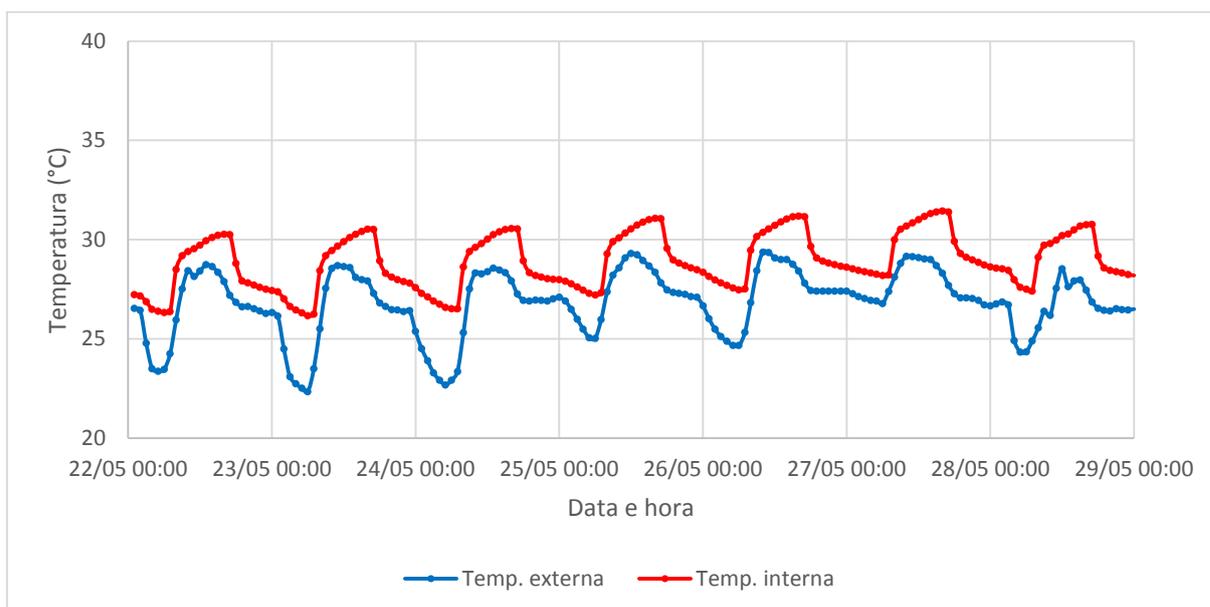


Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 57 - Temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo (SE) na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 58 - Temperatura interna do ambiente com telhado extensivo (SE) na estação chuvosa.

Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação chuvosa, em nenhum momento, a temperatura interna foi inferior à temperatura externa, em virtude da presença de janelas, como explicado no caso anterior. O atraso térmico, por sua vez, foi de 4,57 h.

5.2.10 Simulação SI

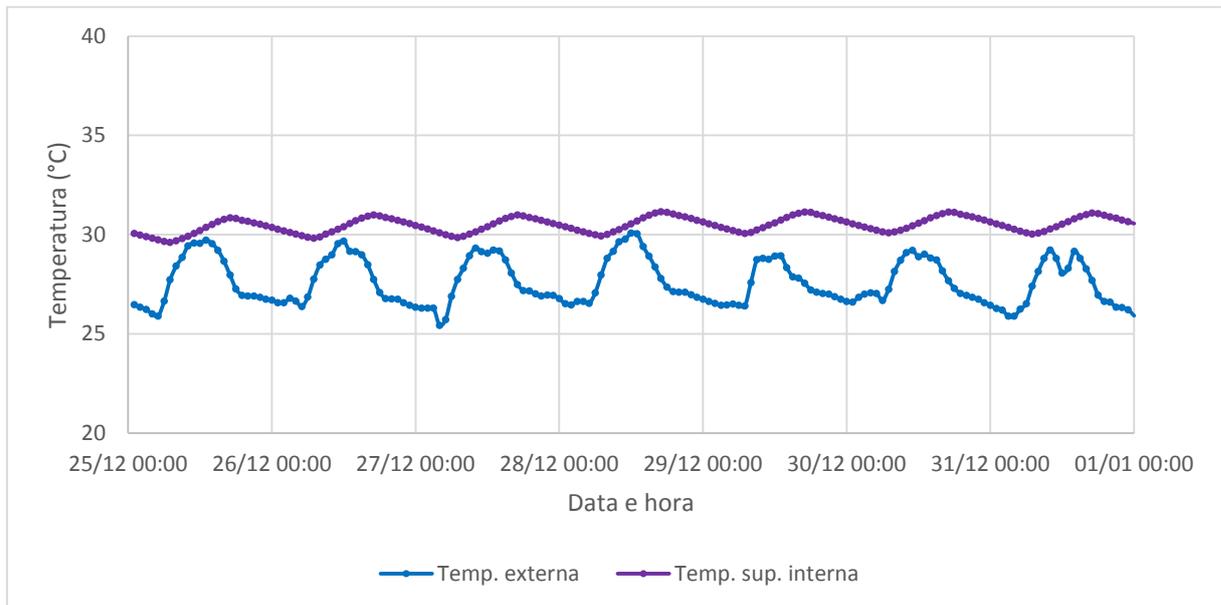
Conforme explicado anteriormente, essa simulação ocorreu na sala de aula com telhado intensivo. Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, para a estação seca, estão representados no Quadro 28 e nos Gráficos 59 a 61.

Quadro 28 - Dados de temperatura do telhado intensivo (SI) na estação seca.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	1,54	12,86	3,87
Temperatura média [°C]	30,49	34,54	29,99
Temperatura máxima [°C]	31,15	42,58	31,98

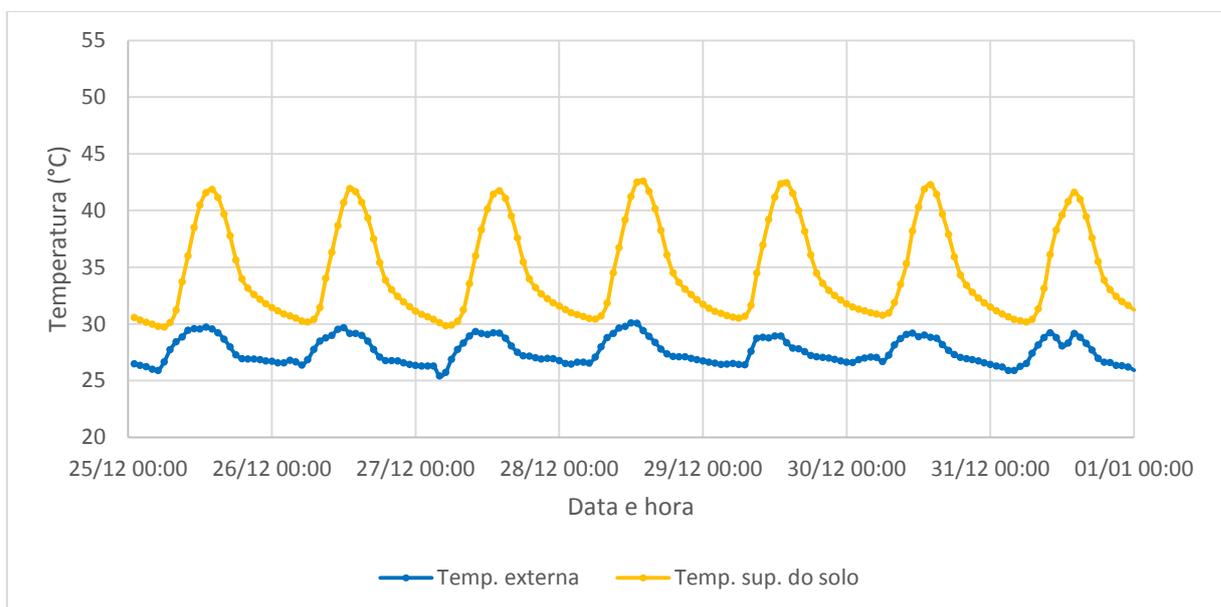
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 59 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo (SI) na estação seca.

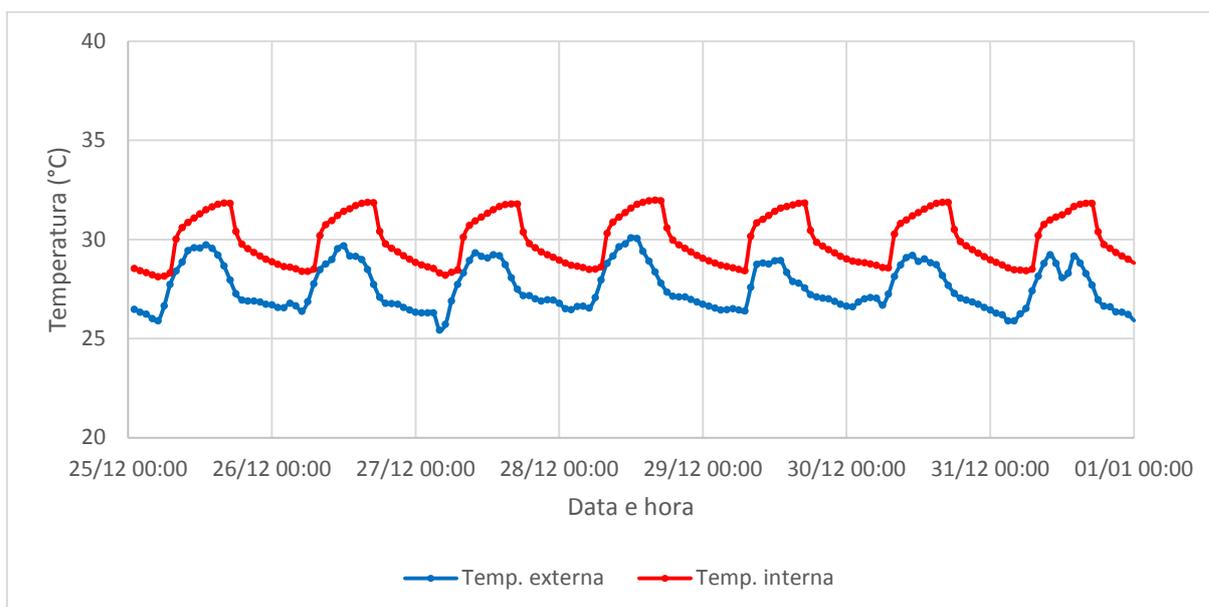


Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 60 - Temperatura superficial externa do telhado intensivo (SI) na estação seca.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo.

Gráfico 61 - Temperatura interna do ambiente com telhado intensivo (SI) na estação seca.

Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

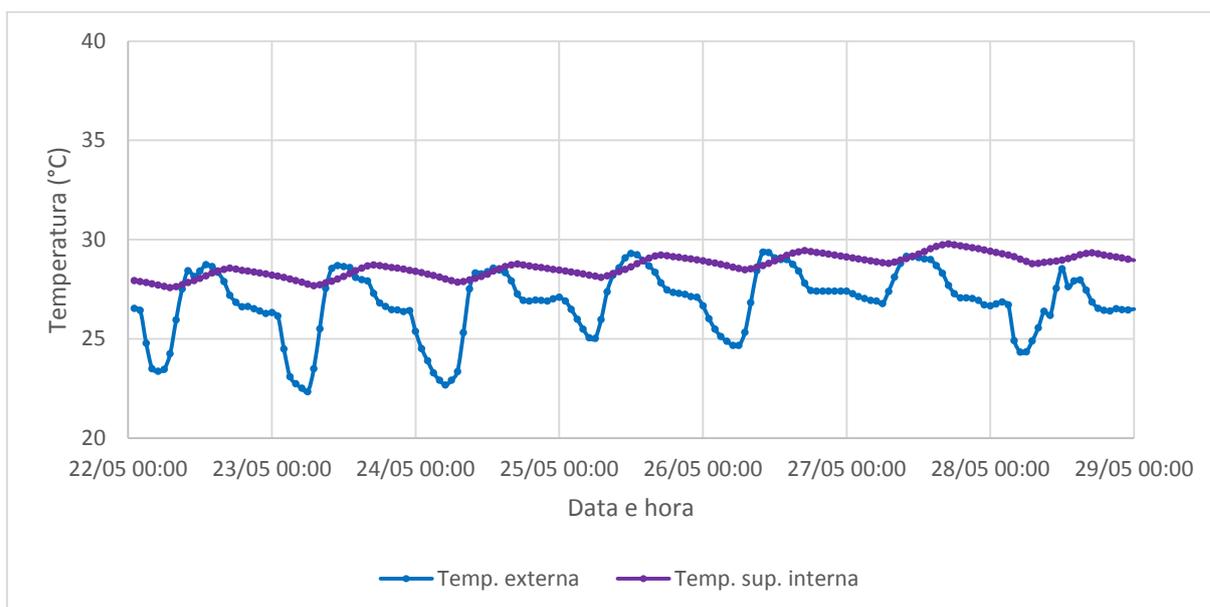
Na estação seca, o atraso térmico foi de 4,71 h e em nenhum momento, a temperatura interna foi inferior à temperatura externa, visto que a presença de janelas eleva o ganho de calor em climas quentes (DIAS, 2011).

Os dados de amplitude térmica, temperatura média e temperatura máxima obtidos nessa simulação, no caso da estação chuvosa, estão representados no Quadro 29 e nos Gráficos 62 a 64.

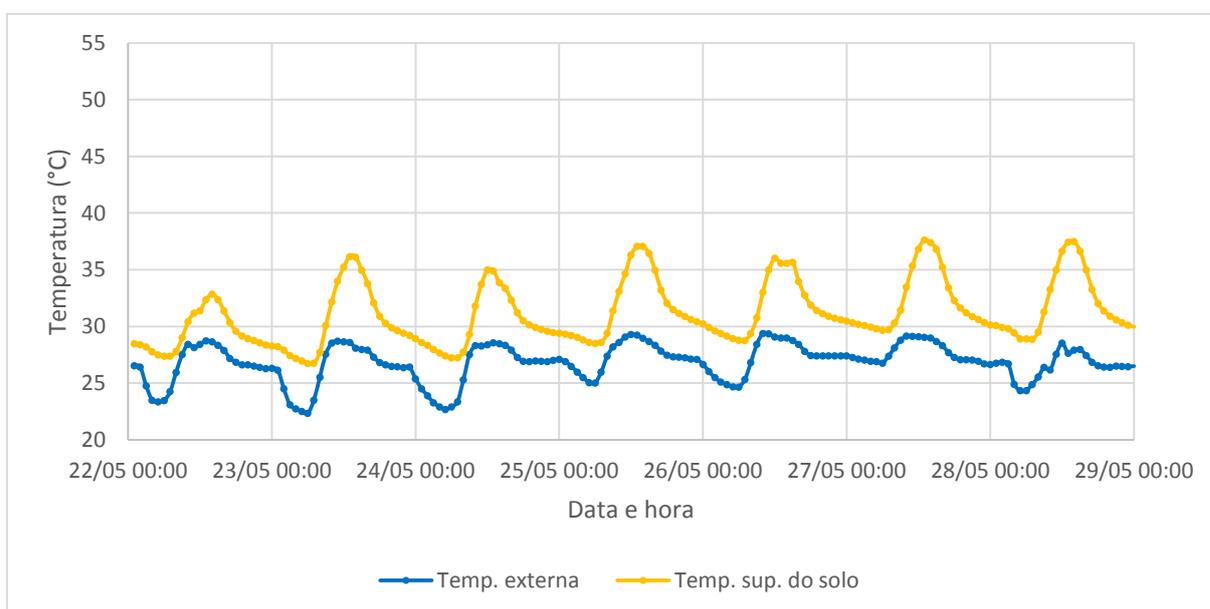
Quadro 29 - Dados de temperatura do telhado intensivo (SI) na estação chuvosa.

	Temp. sup. interna	Temperatura do solo	Temperatura interna
Amplitude térmica [°C]	2,20	10,90	5,16
Temperatura média [°C]	29,78	37,64	31,23
Temperatura máxima [°C]	28,67	31,12	28,71

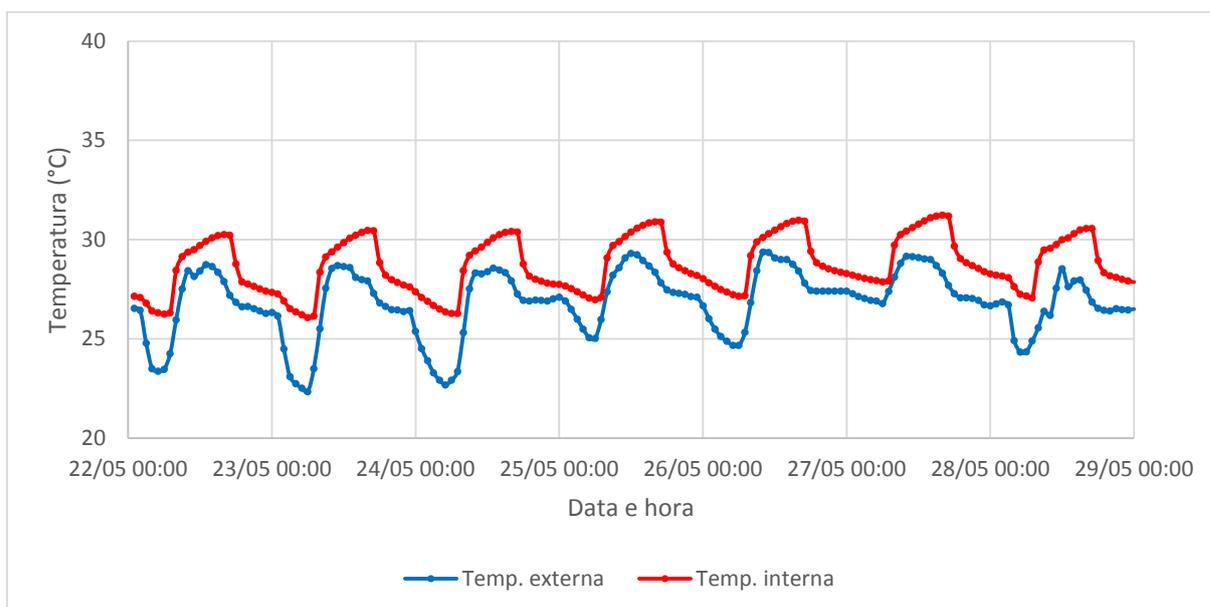
Legenda: Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 62 - Temperatura superficial interna do telhado intensivo (SI) na estação chuvosa.

Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. interna: temperatura superficial interna.

Gráfico 63 - Temperatura superficial externa do solo do telhado intensivo (SI) na estação chuvosa.

Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. sup. do solo: temperatura superficial externa do solo

Gráfico 64 - Temperatura interna do ambiente com telhado intensivo (SI) na estação chuvosa.

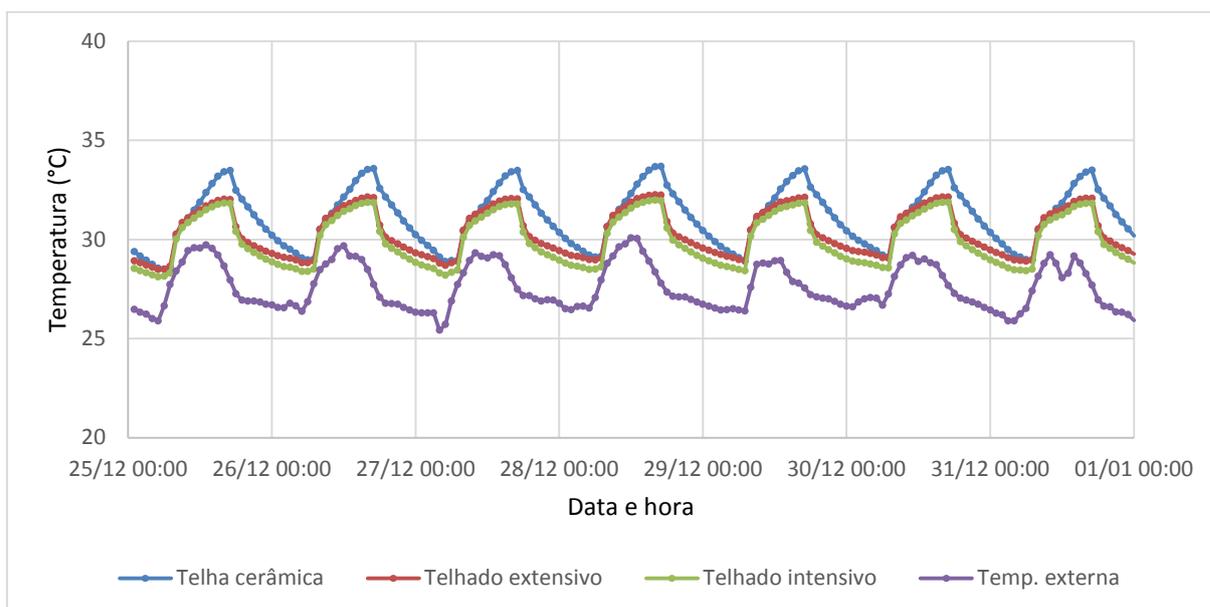
Legenda: Temp. externa: temperatura externa. Temp. interna: temperatura interna.

Na estação chuvosa, em nenhum momento, a temperatura interna foi inferior à temperatura externa, por causa da presença de janelas, como explicado anteriormente. O atraso térmico, por sua vez, foi de aproximadamente 4,43 h.

5.2.11 Comparações entre as três tipologias de cobertura

Os resultados das comparações das temperaturas internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação seca, estão representados no Gráfico 65.

Gráfico 65 - Temperaturas internas da sala com os diferentes tipos de cobertura na estação seca.

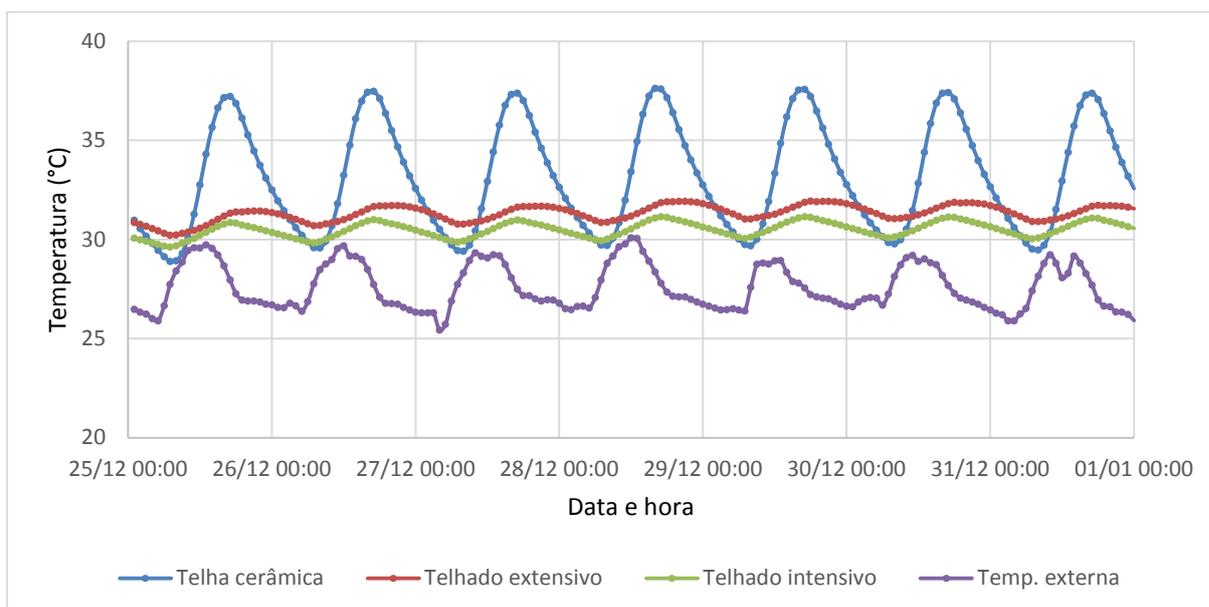


Na estação seca, as temperaturas internas da sala com telha cerâmica foram inferiores às da sala com telhado extensivo nos seguintes dias e horários: das 7 h às 10 h do dia 25/12; das 8 h às 9 h do dia 26/12; das 8 h às 10 h do dia 27/12; às 9 h do dia 28/12; das 8 h às 9 h do dia 29/12; das 8 h às 10 h do dia 30/12 e das 8 h às 10 h do dia 31/12. Esse fato ocorreu em razão de a telha cerâmica absorver umidade à noite, que é eliminada durante o período matutino, como ocorreu de forma semelhante para o protótipo (BUENO, 1994).

Em média, a temperatura interna da sala com telha cerâmica foi 0,78 °C mais elevada que a temperatura interna da sala com telhado extensivo e 1,15 °C mais elevada que a temperatura interna da sala com telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação seca, estão representados no Gráfico 66.

Gráfico 66 - Temperaturas superficiais internas dos telhados na estação seca.



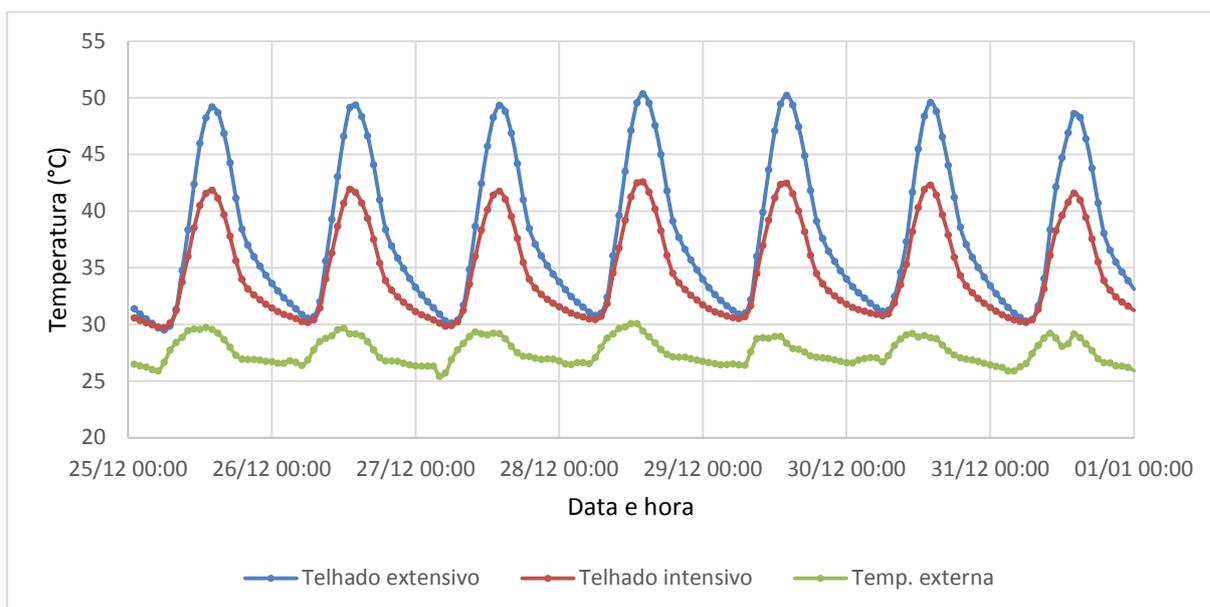
Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

As temperaturas superficiais internas da telha cerâmica, na estação seca, foram inferiores às do telhado extensivo nos seguintes dias e horários: das 2 h às 10 h do dia 25/12; das 3 h às 10 h do dia 26/12; das 3 h às 10 h do dia 27/12; das 3 h às 10 h do dia 28/12; das 3 h às 10 h do dia 29/12; das 3 h às 10 h do dia 30/12 e das 3 h às 10 h do dia 31/12. Esse fato aconteceu por causa do comportamento da telha cerâmica: à noite, a telha absorve umidade, que é eliminada durante o começo do dia (BUENO, 1994).

Em média, a temperatura superficial interna da telha cerâmica foi 1,79 °C mais elevada que a temperatura superficial interna do telhado extensivo e 2,61 °C mais elevada que a temperatura superficial interna do telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais externas para o telhado extensivo e o intensivo, no caso da estação seca, estão representados no Gráfico 67.

Gráfico 67 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados na estação seca.

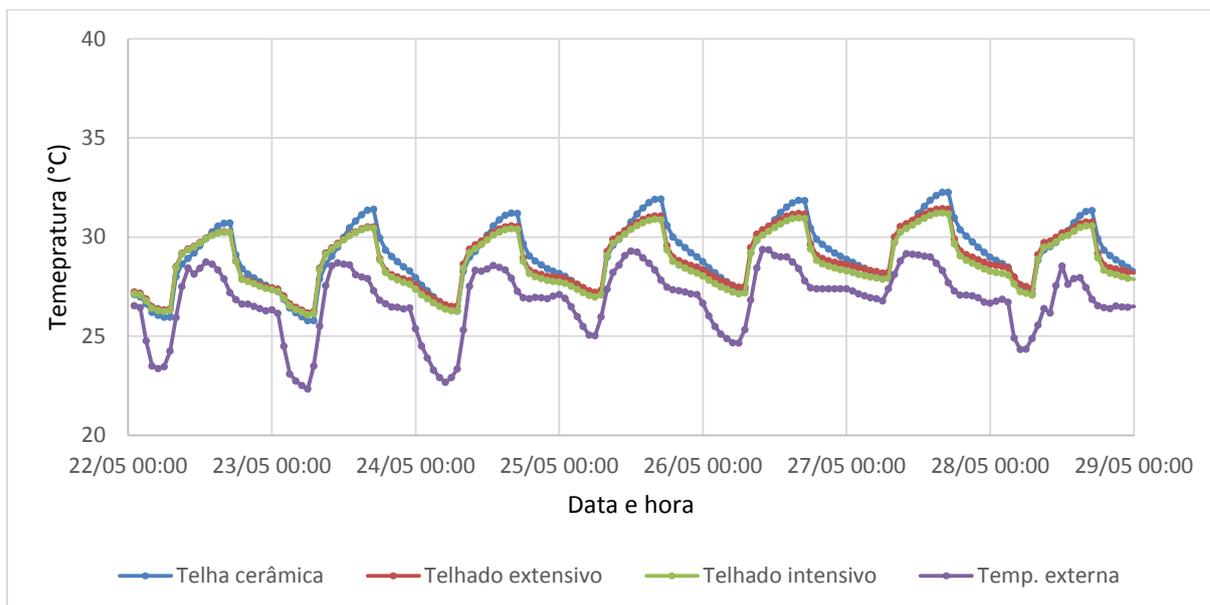


Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

Na estação seca, as temperaturas superficiais externas do solo do telhado verde extensivo foram inferiores às do telhado intensivo das 5 h às 7 h do dia 25/12. No período citado, a radiação solar foi bastante baixa, o que reduziu a taxa de evapotranspiração da vegetação. Uma vez que a vegetação do telhado intensivo é mais densa que a do extensivo, o desempenho térmico do primeiro foi inferior ao do segundo nesses horários, por conta da diminuição da taxa de evapotranspiração. Em média, a temperatura do solo do telhado extensivo foi 3,32°C mais elevada que a temperatura do solo do telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas internas para os três tipos de cobertura, para a estação chuvosa, estão representados no Gráfico 68.

Gráfico 68 - Temperaturas internas da sala com os diferentes tipos de cobertura na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

Na estação chuvosa, as temperaturas internas da sala com telha cerâmica foram inferiores às da sala com telhado extensivo e às da sala com telhado intensivo em alguns horários. O melhor desempenho térmico da telha cerâmica em relação aos dois tipos de telhado verde nesses horários ocorreu por dois motivos: a capacidade da telha cerâmica em absorver umidade à noite e eliminá-la durante o começo da manhã e a diminuição da taxa de evapotranspiração da cobertura verde em períodos chuvosos (BUENO, 1994; THEODOSIU, 2003).

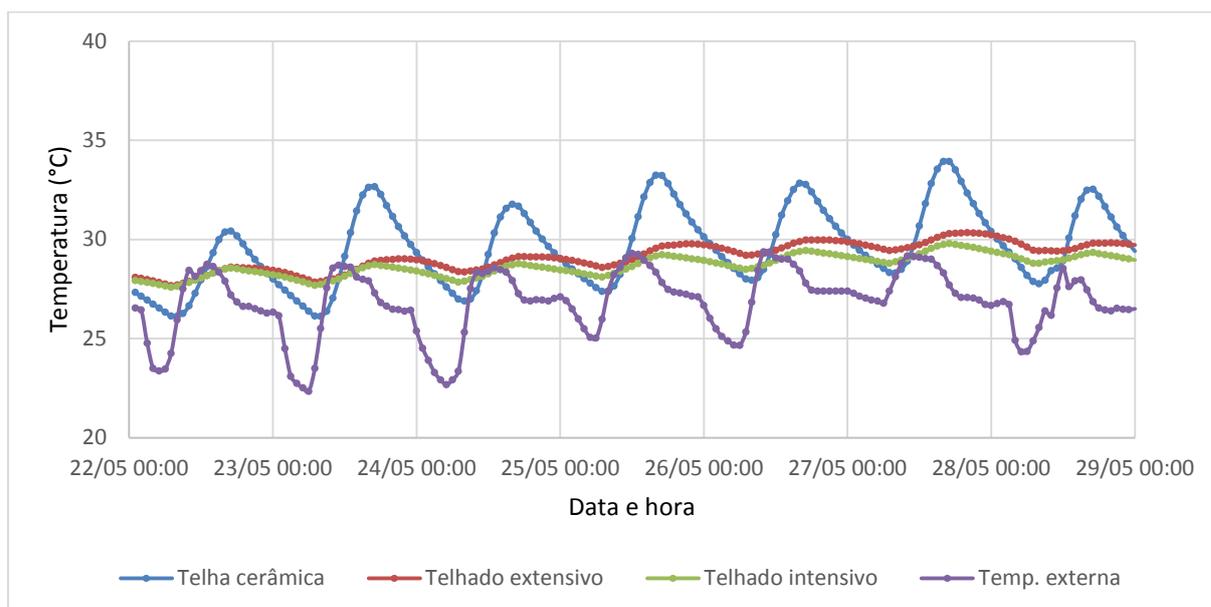
No caso do telhado extensivo, as temperaturas internas da sala com telha cerâmica foram inferiores às temperaturas da sala com telhado extensivo nos seguintes dias e horários: de 1 às 13 h do dia 22/05; de 0 h às 11 h do dia 23/05; das 5 h às 11 h do dia 24/05; das 3 h às 11 h do dia 25/05; das 5 h às 11 h do dia 26/05; das 4 h às 11 h do dia 27/05 e das 4 h às 12 h do dia 28/05.

No caso do telhado intensivo, as temperaturas internas da sala com telha cerâmica foram inferiores às temperaturas da sala com telhado intensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 12 h do dia 22/05; de 1 h às 11 h do dia 23/05; das 7 h às 10 h do dia 24/05; das 8 h às 10 h do dia 25/05; às 9 h do dia 26/05 e das 8 h às 11 h do dia 28/05.

Em média, a temperatura interna da sala com telha cerâmica foi 0,21 °C mais elevada que a temperatura interna da sala com telhado extensivo e 0,41 °C mais elevada que a temperatura interna da sala com telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais internas para os três tipos de cobertura, no caso da estação chuvosa, estão representados no Gráfico 69.

Gráfico 69 - Temperaturas superficiais internas dos telhados na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

As temperaturas superficiais internas da telha cerâmica, na estação chuvosa, foram inferiores às temperaturas do telhado extensivo e do intensivo em alguns horários. Nesses períodos, a telha cerâmica apresentou melhor desempenho térmico em comparação às duas tipologias de telhado verde por duas razões: a telha cerâmica absorve umidade à noite, que é eliminada durante o começo da manhã e em períodos chuvosos, ocorre redução da taxa de evapotranspiração do telhado verde, o que piora o desempenho térmico desse tipo de telhado (BUENO, 1994; THEODOSIU, 2003).

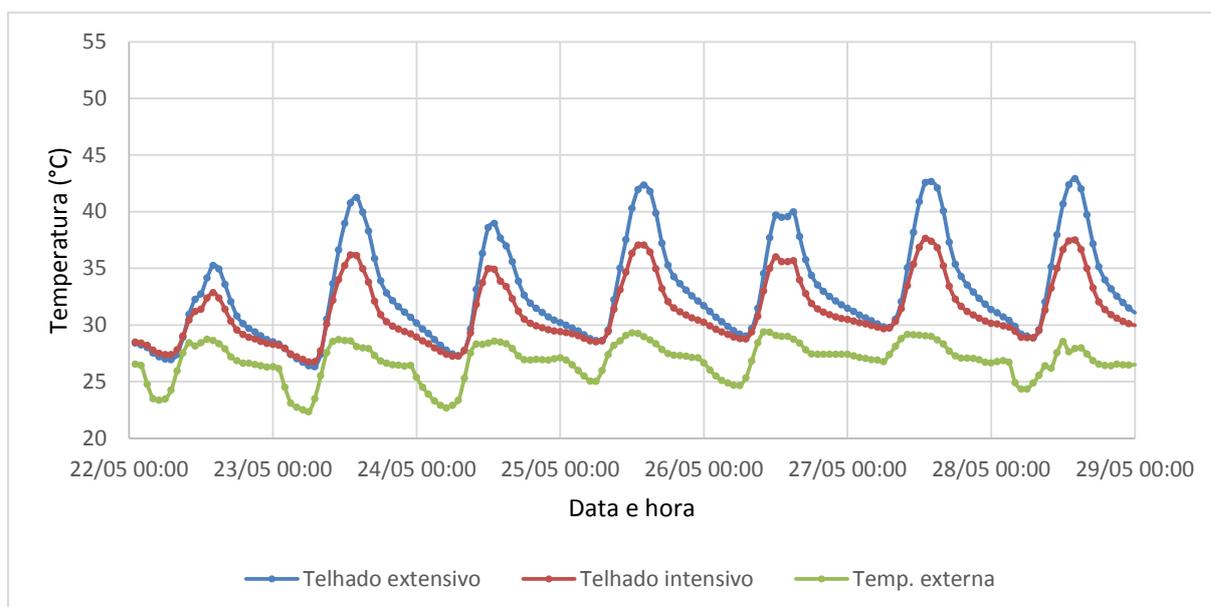
No caso do telhado verde extensivo, as temperaturas superficiais internas da telha cerâmica foram inferiores às temperaturas do telhado extensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 12 h do dia 22/05; de 0 h às 11 h do dia 23/05; das 2 h às 11 h do dia 24/05; de 0 h às 10 h do dia 25/05; das 2 h às 11 h do dia 26/05; de 1 h às 10 h do dia 27/05 e de 1 h às 12 h do dia 28/05.

No caso do telhado verde intensivo, as temperaturas superficiais internas da telha cerâmica foram inferiores às temperaturas do telhado intensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 12 h do dia 22/05; de 0 h às 11 h do dia 23/05; das 4 h às 10 h do dia 24/05; das 3 h às 10 h do dia 25/05; das 5 h às 10 h do dia 26/05; das 5 h às 10 h do dia 27/05 e das 4 h às 12 h do dia 28/05.

Em média, a temperatura superficial interna da sala com telha cerâmica foi 0,49 °C mais elevada que a temperatura superficial interna da sala com telhado extensivo e 0,94 °C mais elevada que a temperatura superficial interna da sala com telhado intensivo.

Os resultados das comparações das temperaturas superficiais externas para o telhado extensivo e o intensivo, para a estação chuvosa, estão representados no Gráfico 70.

Gráfico 70 - Temperaturas superficiais externas do solo dos telhados na estação chuvosa.



Legenda: Temp. externa: temperatura externa.

Na estação chuvosa, as temperaturas superficiais externas do solo do telhado verde extensivo foram inferiores às do telhado intensivo nos seguintes dias e horários: de 1 h às 9 h do dia 22/05; das 3 h às 8 h do dia 23/05 e às 7 h do dia 28/05. Nesses horários, a radiação solar foi baixa, o que proporcionou a redução da evapotranspiração da vegetação. Uma vez que a vegetação do telhado intensivo possui maior IAF em comparação com a do extensivo, o desempenho térmico do primeiro foi inferior ao segundo nesse período, por conta da diminuição da taxa de evapotranspiração.

Em média, a temperatura superficial externa do solo do telhado extensivo foi 1,77°C mais elevada que a do telhado intensivo. Isso se deve ao fato de o telhado intensivo possuir vegetação mais densa (maior IAF) e de maior altura em comparação com o telhado extensivo. O maior valor de IAF contribui para a melhoria do sombreamento. Já o aumento da altura da vegetação faz com que a velocidade do vento na área da folhagem também aumente, elevando o fluxo de calor absorvido pela folhagem e evitando que o solo absorva fluxo de calor excessivo (SILVA, 2014).

6 CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos com as simulações, inferiu-se que as coberturas verdes, em particular a intensiva, contribuem para a melhoria do microclima interno da edificação e apresentam desempenho térmico superior em comparação com a telha cerâmica não esmaltada, confirmando o que era esperado.

Pela análise dos resultados, percebeu-se que na estação chuvosa, houve uma melhora do desempenho térmico da telha cerâmica, visto que a mesma absorve mais umidade no período chuvoso em comparação com o período seco (BUENO, 1994).

No caso das simulações TCPD, TEPD e TIPD, na estação seca, a temperatura interna do protótipo com telha cerâmica foi 0,62 °C mais elevada que a do ambiente com telhado extensivo e 0,89°C mais elevada que a do ambiente com telhado intensivo. Já na estação chuvosa, a temperatura interna do protótipo com telha cerâmica foi 0,22 °C mais elevada que a do ambiente com telhado extensivo e 0,37 °C mais elevada que a do ambiente com telhado intensivo.

Nas simulações em que as paredes foram consideradas adiabáticas (simulações TCPA, TEPA e TIPA), foi possível perceber, de maneira mais evidente, a melhoria no microclima interno mediante a instalação de telhados verdes.

Na estação seca, a temperatura interna do protótipo com telha cerâmica foi 2,42 °C mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado extensivo e 3,65 °C mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado intensivo. Na estação chuvosa, por sua vez, a temperatura interna do protótipo com telha cerâmica foi 0,59 °C mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado extensivo e 1,16 °C mais elevada que a temperatura interna do protótipo com telhado intensivo.

No caso das simulações da sala de aula, apesar de que em nenhum momento a temperatura interna foi inferior à externa para nenhuma tipologia de cobertura, ficou evidente a diminuição da temperatura interna mediante a instalação do telhado verde.

Na estação seca, a temperatura interna da sala com telha cerâmica foi 0,78 °C mais elevada que a temperatura interna da sala com telhado extensivo e 1,15 °C mais elevada que a temperatura interna da sala com telhado intensivo. Já na estação chuvosa, a temperatura interna da sala com telha cerâmica foi 0,21 °C mais elevada que a temperatura interna da sala

com telhado extensivo e 0,41 °C mais elevada que a temperatura interna da sala com telhado intensivo.

Vale ressaltar que as diferenças de temperatura obtidas entre os três tipos de cobertura ocorreram em condições experimentais. Na prática, diferenças de temperatura dessa ordem de magnitude auxiliaram no conforto térmico do usuário desses ambientes.

Ao realizar a comparação entre o telhado intensivo e o extensivo, percebeu-se o melhor desempenho térmico do primeiro em relação ao segundo. Isso ocorreu em virtude de o telhado intensivo possuir substrato mais espesso, maior IAF e vegetação de maior altura, contribuindo para o aumento da inércia térmica, do sombreamento e da evapotranspiração da vegetação.

A principal limitação do trabalho residiu no fato de não ter sido possível realizar também medições experimentais em conjunto com as simulações computacionais, o que aumentaria a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação do desempenho térmico de coberturas verdes através de medições experimentais, a análise da influência dos telhados verdes para diferentes tipologias de edificações (residencial, comercial, industrial etc) e a análise da viabilidade econômica concernente à implantação desse tipo de cobertura.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

- - - -. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

- - - -. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

- - - -. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.

- - - -. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

AGNOL, L. D. et al. Sustentabilidade na arquitetura brasileira. In: 2º SEMINÁRIO NACIONAL DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS, 2013, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo, 2013.

AGUIAR, C.; FEDRIZZI, B. Telhados verdes na habitação de interesse social. In: CONGRESSO INTERNACIONAL: SUSTENTABILIDADE E HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 2010, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2010.

ALEXANDRI, E.; JONES, P. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: comparison with experimental results. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, 2007, p. 2835-2849.

ALMEIDA, S. P. C. de. et al. Revisão histórica dos telhados verdes: da Mesopotâmia aos dias atuais. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 2, n. 1, 2018, p. 42-51.

AMERICAN HYDROTECH INC. Disponível em: <<https://www.hydrotechusa.com/assemblies/garden-roof-assembly>>. Acesso em 20 de outubro de 2018.

ANJOS, M. et al. Rede climatológica urbana aplicada ao estudo da ilha de calor em Aracaju-SE. **Caminhos de Geografia**, v. 18, n. 62, 2017, p. 203-216.

ARANHA, K. C. **Tecnologias sustentáveis**: a importância dos telhados verdes na amenização microclimática. 2016. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio

Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

ARAÚJO, H. M. de; VILAR, J. W. C. Elementos componentes do sistema ambiental físico de Aracaju/SE. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA / I ENCONTRO SUL-AMERICANO DE GEOMORFOLOGIA, 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, 2004.

ARAÚJO, H. M. de et al. O clima de Aracaju na interface com a geomorfologia de encostas. **Scientia Plena**, v. 6, n. 8, 2010, p. 1-9.

ARAÚJO, M. E. M. **Desempenho cognitivo em ambiente moderado**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós - Graduação em Engenharia, Universidade do Minho. Braga, 2012.

ASCIONE, F. et al. Green roofs in European climates: are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? **Applied Energy**, v. 104, 2013, p. 845-859.

BERARDI, U.; GHAFARIAN-HOSEINI, A. H.; GHAFARIAN-HOSEINI, A. State-of-art analysis of the environmental benefits of green roofs. **Applied Energy**, v. 115, 2014, p. 411-428.

BEYER, P. O. **Condutividade térmica equivalente do ecotelhado**. Porto Alegre, 2008.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 1703, de 29 de junho de 2011**. Dispõe sobre a instalação do denominado “Telhado Verde” e dá outras providências. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=510512>>. Acesso em 12 de set. de 2018.

BUENO, A. D. **Transferência de calor e umidade em telhas: simulação e análise experimental**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

CABÚS, R. C. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in North-east Brazil**. 2002. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Sheffield, Sheffield, 2002.

CASTLETON, H. F. et al. Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, 2010, p. 1582-1591.

CATUZZO, H. **Telhado verde: impacto positivo na temperatura e umidade do ar. O caso da cidade de São Paulo.** 2013. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CHAGOLLA-ARANDA, M. A. et al. Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico. **Energy and Buildings**, v. 154, 2017, p. 232-243.

CHAMBEL, T. **O que são plantas trepadeiras.** Disponível em: <<https://revistajardins.pt/o-que-sao-plantas-trepadeiras/>>. Acesso em 12 de nov. de 2018.

CHAN, A. L. S.; CHOW, T. T. Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong. **Energy and Buildings**, v. 64, 2013, p. 182-198.

COLTRI, P. P. et al. Influência do uso e cobertura do solo nas ilhas de calor local e regional no município de Piracicaba, São Paulo. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009.

CONCEIÇÃO, M. J. **Clima urbano e sua influência na saúde de Aracaju.** 2017. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

CONNELLY, M.; HOGGSON, M. Laboratory experimental investigation of the acoustical characteristics of vegetated roofs. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 129, n. 4, 2011.

COSTA, L. C. do N. **Aproveitamento da ventilação natural nas habitações: um estudo de caso na cidade de Aracaju – SE.** 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CURRIE, B. A.; BASS, B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, 2008, p. 409-422.

DIAS, A. F. A. **Análise do uso da luz natural em salas de aula: estudo de caso em Aracaju - SE.** 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

DIAS, A. E. **O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

DOE. **Getting started with EnergyPlus (2016).** Estados Unidos da América, 2016.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas:** métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidades Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

EMILSSON, T. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment, method and species mix. **Ecological Engineering**, v. 33, n. 3-4, 2008, p. 265-277.

EUMORFOPOULOU, E.; ARAVANTINOS, D. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 1, 1998, p. 29-36.

FENG, C.; MENG, Q.; ZHANG, Y. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, 2010, p. 959-965.

FERRAZ, I. L. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FRANÇA, L. C. de J. O uso do telhado verde como alternativa sustentável aos centros urbanos: opção viável para a sociedade moderna do século XXI. **Revista Húmus**, v. 2, n. 4, 2012, p. 105-113.

FRANÇA, T. P. P. de et al. Arborização de Aracaju: uma percepção dos seus moradores. **Geografia (Londrina)**, v. 21, n. 2, 2012, p. 05-22.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor:** como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Tradução de Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 248 p.

GETTER, K. L.; ROWE, D. R. The role of extensive green roofs in sustainable development. **Hort Science**, v. 41, n. 5, 2006, p. 1276-1285.

GONÇALVES, F. L. A. **Desempenho térmico da envoltória:** estudo de caso para a região de Belo Horizonte. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

GREEN ROOF. **Green roof technology.** Disponível em: <<http://www.greenrooftechnology.com/>>. Acesso em 15 de junho de 2019.

GUIMARÃES, R. P. **Comportamento térmico do ambiente construído:** influência do pé-direito e de materiais das paredes envoltórias. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

HUANG, Y. Y.; CHEN, C. T.; LIU, W. T. Thermal performance of extensive green roofs in a subtropical metropolitan area. **Energy and Buildings**, v. 159, n. 15, 2018, p. 39-53.

IBGE. **Dados gerais do município de Aracaju.** Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=280030&search=sergipe|aracaju|infogr%Elficos:-dados-gerais-do-munic%EDpio>>. Acesso em 20 de agosto de 2018.

JOBIM, A. L. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

KASERA, S.; NAYYAR, A.; SHARMA, D. The energy consumption performance of roof garden. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 13, n. 7, 2012.

KÖHLER, M. et al. Green roofs in temperate climates and the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. **Environmental Management and Health**, v. 13, n. 4, 2002, p. 382-391.

KOSAREO, L; RIES, R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. **Building and Environment**, v. 42, n. 7, 2007, p. 2606-2613.

KOTSIRIS, G. et al. An adaptive approach to intensive green roofs in the Mediterranean climatic region. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 12, n. 3, 2013, p. 380-392.

LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos INMET 2018.** Acesso em 01 de março de 2019.

LAMBERTS, R. et al. **Casa Eficiente: Bioclimatologia e Desempenho Térmico – Vol. 1.** Florianópolis: UFSC/ LABEEE, 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na Arquitetura.** 4ª ed., Florianópolis: UFSC/LABEEE, 2014.

LI, W. C.; YEUNG, K. K. A. A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 1, 2014, p. 127-134.

LOPES, A. A. et al. Avaliação espaço-temporal do albedo de superfície no município de Maracaju, MS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECOLOGIA DE PAISAGENS. **Anais...** Salvador, BA: IALE-BR, 2012.

LOPES, D. A. R. **Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura.** 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M. de. **Plantas ornamentais no Brasil: arbustivas, herbáceas e trepadeiras.** 4. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008. 1088 p.

LUCKET, K. **Green roof construction and maintenance.** 1ª ed., Nova York: McGraw-Hill Professional, 2009.

MARÇAL, V. G. et al. Relevância e percepção do conforto térmico no processo de aprendizagem em sala de aula. **Boletim Técnico do Senac**, v. 44, n. 2, 2018.

MARTENS, R.; BASS, B.; ALCAZAR, S. S. Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, 2008, p. 399-408.

MARTINS, C. et al. Desempenho térmico de paredes com estrutura leve em aço enformado a frio. In: X CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA. **Anais...**Coimbra, 2015.

MENDES, B. H. E. **Tetos verdes e políticas públicas: uma abordagem multifacetada.** 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

- MENDONÇA, T. N. M. de. **Telhado verde extensivo em pré-moldado de concreto EVA (acetato etil vinila)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba, 2015.
- MINKE, G. **Techos verdes** – Planificación, ejecución, consejos prácticos. Uruguay: Editora Fin del Siglo, 2005.
- MORAIS, C. S. **Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos – SP**. 2004. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- MORAU, D.; LIBELLE, T.; GARDE, F. Performance evaluation of green roof for thermal protection of buildings in Reunion Island. **Energy Procedia**, v. 14, 2012, p. 1008-1016.
- NAGASE, A.; DUNNETT, N. Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: effects of watering and diversity. **Landscape and Urban Planning**, v. 97, n. 4, 2010, p. 318-327.
- NIACHOU, A. et al. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and Building**, v. 33, n. 7, 2001, p. 719-729.
- OBERNDORFER, E. et al. Green roofs as urban ecosystems: ecological, structures, functions, and services. **BioScience**, v. 57, n. 10, 2007, p. 823-833.
- ORDENES, M. et al. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDOE-3.1**. Florianópolis, 2003.
- PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, 2011, p. 1712-1722.
- PECK, S. W. et al. **Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada**. Canadá: Canada Mortgage and Housing Corporation, 1999.
- PÉREZ, G. et al. The thermal behavior of extensive green roofs under low plant coverage conditions. **Energy Efficiency**, v. 8, n. 5, 2015, p. 881-894.

PÉREZ, J. C. et al. Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de México. **Ciudades** **51**, 2001, p. 19-24.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas de pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RECIFE. **Lei nº 18112, de 12 de janeiro de 2015**. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Recife, 2015. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=280138>>. Acesso em 14 de novembro de 2018.

ROSSETI, K. A. C. **Efeitos do uso de telhados vegetados em ilhas de calor urbanas com simulação pelo software ENVI-Met**. 2013. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

SAADATIAN, O. et al. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, 2013, p. 155-168.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 8, 2008, p. 1466-1478.

SANTA CATARINA. **Lei nº 14243, de 11 de dezembro de 2007**. Dispõe sobre a implementação de sistemas de maturação através da criação de telhados verdes em espaços urbanos de Santa Catarina. Santa Catarina, 2007. Disponível em: <<http://www.leisestaduais.com.br/sc/lei-ordinaria-n-14243-2007-santa-catarina-dispoe-sobre-a-implementacao-de-sistemas-de-naturacao-atraves-da-criacao-de-telhados-verdes-em-espacos-urbanos-de-santa-catarina>>. Acesso em 12 de set. de 2018.

SÃO PAULO. **Lei nº 16277, de 5 de outubro de 2015**. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do "Telhado Verde" nos locais que especifica e dá outras providências. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://dobuscadireta.imprensaoficial.com.br/default.aspx?DataPublicacao=20151006&Caderno=DOC&NumeroPagina=1>>. Acesso em 12 de set. de 2018.

SAVI, A. C. **Telhados verdes: uma análise das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) -

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SCHWEITZER, O.; ERELL, E. Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 68, parte A, 2014, p. 25-32.

SILVA, M.; TALAIA, M. O conforto térmico e a aprendizagem em ambientes considerados frios: estudo de caso. In: XXXII JORNADA CIENTÍFICA DE LA AME - 13º ENCUESTRO HISPANO-LUSO DE METEOROLOGIA, 2002, Madri. **Proceedings...** Madri: 2012.

SILVA, M. F. da R. e. **Simulação energética de coberturas verdes**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2014.

SILVEIRA, J. O. N. da et al. Telhado verde: um passo para a economia e sustentabilidade. **Unipacto**, 2016.

SMITH, K. R.; ROEBBER, P. J. Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 3, 2011, p. 507-522.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SPAGNUOLO, A. Y. N. et al. Conforto térmico de edifício escolar padrão proinfância tipo B em três regiões bioclimática brasileiras distintas. In: 17º ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

THEODOSIOU, T. G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 9, 2003, p. 909-917.

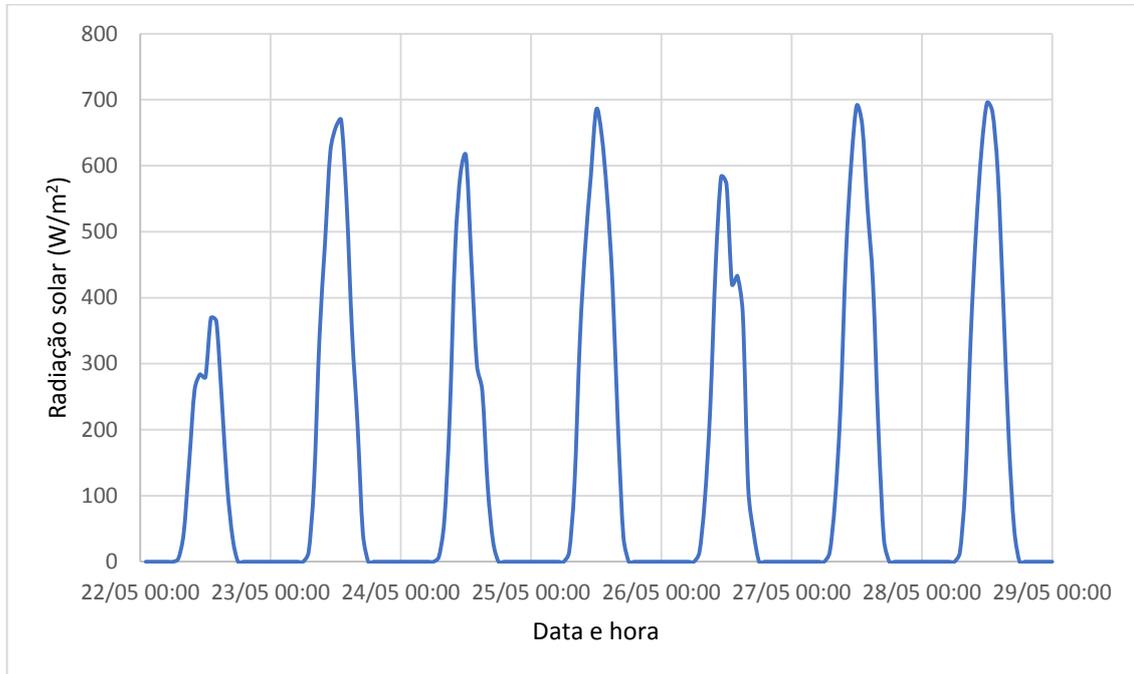
TORRES, D. de A. **Desempenho térmico de habitações populares em Alagoas: alternativas para adequação climática**. 2015. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

UHMANN, I. M. de S. **Readequação de coberturas através da técnica de telhados verdes: estudo de caso nas escolas públicas do Estado do Paraná.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

YANG, J.; YU, Q.; GONG, P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 31, 2008, p. 7266-7273.

ZHAO, M.; SREBRIC, J. Assessment of green roof performance for sustainable buildings under winter weather conditions. **Journal of Central South University**, v. 19, n. 3, 2012, p. 639-644.

APÊNDICE A

Gráfico 71 - Radiação solar global para a semana representativa da estação chuvosa.**Gráfico 72 - Radiação solar global para a semana representativa da estação seca.**